

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Igor Gavilon

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS EM BANCADAS DE ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES DE REFRIGERAÇÃO

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Metrologia

Orientador: Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis, 06 de novembro de 2008

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS EM BANCADAS DE ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES DE REFRIGERAÇÃO

Igor Gavilon

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng.

ORIENTADOR

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr. Ing.

Prof. Saulo Güths, Dr. Eng.

Eng. Maikon Ronsani Borges, M. Eng.

*À minha mãe,
Terezinha Gavilon*

*À minha avó,
Domingas Gavilon*

*À minha tia,
Evanir Silva*

*À minha namorada,
Jóice Fabiana Fachini*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Carlos Alberto Flesch, por seu apoio, dedicação e paciência na realização e conclusão deste trabalho.

À minha mãe, Terezinha Gavilon, à minha avó e também mãe, Domingas Gavilon, e à minha tia Evanir Silva, pelo amor, incentivo e apoio em todas as minhas escolhas. Sem vocês, com certeza, eu não teria chegado até aqui.

À minha namorada Joice Fabiana Fachini e sua família, que aprendi a considerar também meus familiares. Vocês fizeram a distância da minha família ser menos dolorosa durante esse tempo longe de casa.

Aos amigos que estiveram ao meu lado nessa batalha: Alexandre, Flávio, Kleber, Mauro, Miguel, Rafael, Sérgio, Sidnei e Vanderson.

À todos os colegas, professores e funcionários do Labmetro pela convivência sempre agradável e harmoniosa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE ABREVIATURAS.....	11
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	17
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2 ENSAIO DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES.....	19
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES.....	19
2.1.1 Normas.....	19
2.1.2 Objetivos do ensaio	21
2.2 BANCADA DE ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES	22
2.2.1 Configurações de Sistemas de Medição	25
2.2.2 Cadeias de Medição Envolvidas e Grandezas de Interesse	26
3 ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	30
3.1 MÉTODO CLÁSSICO OU DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS	31
3.2 MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO OU DA PROPAGAÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES	34
4 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS	38
4.1 REQUISITOS DO SISTEMA	38
4.1.1 Requisitos do Sistema.....	39
4.2 LABVIEW	41
4.2.1 Instrumentos Virtuais.....	42
4.2.2 Análise da Ferramenta de Desenvolvimento.....	42
4.3 O SISTEMA DESENVOLVIDO.....	43
4.3.1 Subdivisões Adotadas.....	43
4.3.2 Estrutura da Solução Proposta.....	45
5 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO A UMA BANCADA DE ENSAIOS.....	54
5.1.1 Cadeia de Medição de Temperatura	56
5.1.2 Cadeias de Medição de Pressão.....	63
5.1.3 Resultados para o COP e capacidade de refrigeração	69

5.2 ANÁLISE DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO	76
6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	81
6.1 CONCLUSÕES	81
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Bancada de ensaio de compressores (HENKLEIN, 2006)	23
Figura 2.2 - Configuração geral do sistema (PETROVIC, 2007)	26
Figura 3.1 - Diagrama do método de estimativa da incerteza de medição (PIZZOLATO, 2006)	33
Figura 3.2 – Fluxograma simplificado da avaliação de incerteza de medição usando o método de simulação de Monte Carlo (KONRATH; DONATELLI, 2005)	35
Figura 4.1 - Sistemática de uso do sistema de simulação	38
Figura 4.2 - Principais elementos do sistema.....	40
Figura 4.3 - Tela de cadastro das categorias de instrumento de medição	46
Figura 4.4 - Tela de entrada da configuração mínima das categorias de instrumento de medição	47
Figura 4.5 - Tela de cadastro dos instrumentos de medição.....	48
Figura 4.6 - Tela de entrada das características metrológicas do instrumento	49
Figura 4.7 - Tela para a entrada da função que caracteriza um parâmetro	49
Figura 4.8 - Tela de Cadastro da Cadeia de Medição.....	50
Figura 4.9 - Tela para a Configuração da Bancada de ensaio	51
Figura 4.10 - Interface para o cálculo e apresentação dos resultados	53
Figura 5.1 - Cadeia de medição de temperatura	56
Figura 5.2 - Histograma da temperatura de evaporação	60
Figura 5.3 - Histograma da temperatura de condensação	61
Figura 5.4 - Histograma da temperatura de sucção	62
Figura 5.5- Cadeia de medição de pressão utilizando transmissor CAN	63
Figura 5.6- Cadeia de medição de pressão utilizando transmissor RS-485.....	63
Figura 5.7 - Histograma da pressão de sucção do compressor	65
Figura 5.8 - Histograma para a pressão de descarga	66

Figura 5.9 - Histograma para a pressão na entrada do calorímetro	67
Figura 5.10 - Histograma para a pressão na saída do calorímetro	68
Figura 5.11 - Histograma da capacidade de refrigeração através do método do calorímetro, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-23,3 e +54,4) °C	71
Figura 5.12 - Histograma da capacidade de refrigeração através do método do fluxo de massa, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-23,3 e +54,4) °C	72
Figura 5.13 - Histograma do COP através do método do calorímetro, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-23,3 e +54,4) °C.....	72
Figura 5.14 - Histograma do COP através do método do fluxo de massa, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-23,3 e +54,4) °C.....	72
Figura 5.15 - Histograma da capacidade de refrigeração através do método do calorímetro, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-35 e +65) °C	75
Figura 5.16 - Histograma da capacidade de refrigeração através do método do fluxo de massa, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-35 e +65) °C	75
Figura 5.17 - Histograma do COP através do método do calorímetro, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-35 e +65) °C.....	76
Figura 5.18 - Histograma do COP através do método do fluxo de massa, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-35 e +65) °C.....	76
Figura 5.19 - Incertezas do COP e da capacidade de refrigeração para a condição (-23,3 e +54,4) °C	79
Figura 5.20 - Incertezas do COP e da capacidade de refrigeração para a condição (-35 e +65) °C	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Requisitos das normas.....	20
Tabela 2.2 - Limites de variação	21
Tabela 2.3 - Combinações de métodos (ISO, 1989)	25
Tabela 4.1 - Inter-relações entre requisitos do sistema e características desejáveis da ferramenta de desenvolvimento	43
Tabela 5.1 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a temperatura de evaporação	60
Tabela 5.2 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a temperatura de condensação.....	61
Tabela 5.3 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a temperatura de sucção.....	62
Tabela 5.4 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a pressão de sucção	65
Tabela 5.5 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a pressão de descarga.....	66
Tabela 5.6 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a pressão na entrada do calorímetro.....	67
Tabela 5.7 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a pressão na saída do calorímetro	68
Tabela 5.8 - Valores gerados pelo sistema desenvolvido e que foram utilizados na determinação dos valores do COP e da capacidade de refrigeração para a condição (-23,3 e +54,4) °C	69
Tabela 5.9 - Valores de referência utilizados na determinação dos valores do COP e capacidade de refrigeração na condição (-23,3 e +54,4) °C	69
Tabela 5.10 - Resultados para o COP e capacidade de refrigeração considerando os valores de referência e os valores obtidos com o sistema proposto na condição (-23,3 e +54,4) °C.....	70
Tabela 5.11 - Valores gerados pelo sistema desenvolvido e que foram utilizados na determinação dos valores do COP e capacidade de refrigeração para a condição (-35 e +65) °C	73
Tabela 5.12 - Valores de referência utilizados na determinação dos valores do COP e da capacidade de refrigeração na condição (-35 e +65) °C	73

Tabela 5.13 - Resultados para o COP e capacidade de refrigeração considerando os valores de referência e os valores obtidos com o sistema proposto na condição (-35 e +65) °C	74
---	----

Tabela 5.14 - Comparação entre os resultados das incertezas do COP e capacidade para os dois métodos de avaliação de incertezas e condições de ensaio.....	79
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
CA	Corrente alternada
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CC	Corrente continua
COP	<i>Coefficient of performance</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light emitting diode</i>
PXI	<i>PCI Extension for Instrumentation</i>
SMC	Simulação de Monte Carlo
VI	<i>Virtual instrument</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

RESUMO

Os ensaios de desempenho figuram entre os mais importantes para a indústria de compressores para refrigeração. A sua principal finalidade é estabelecer a capacidade de refrigeração, o consumo de potência ativa e o coeficiente de performance (COP) do compressor.

Os equipamentos utilizados atualmente para avaliar o desempenho de compressores de refrigeração, em geral, são dimensionados para atender às normas que regulamentam o ensaio. Em certas aplicações – pesquisa e desenvolvimento, por exemplo – as incertezas desejadas podem ser muito menores que as especificadas nas normas comumente utilizadas. No entanto, seja qual for a exatidão requerida, faz-se necessária a determinação da incerteza de medição imposta pelas cadeias de medição utilizadas para medir as grandezas de interesse.

Nesse contexto, este trabalho objetivou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a avaliação da incerteza das cadeias de medição utilizadas em painéis automatizados de ensaios de desempenho de compressores de refrigeração. Foi proposto e desenvolvido um sistema que permite ao usuário caracterizar instrumentos de medição e associá-los para configurar cadeias de medição específicas, possibilitando a análise da incerteza de medição para cada grandeza envolvida, ao longo de todas as faixas de medição e para qualquer condição de ensaio. O método de avaliação da incerteza aplicado foi o da simulação de Monte Carlo.

A validação do sistema consistiu em verificar se as técnicas e metodologias declaradas como conformes na etapa de implementação estavam sendo executadas a rigor. Para isso, foi realizada uma aplicação do sistema a uma bancada de ensaio de desempenho de compressores, comparando-se os resultados obtidos com os da abordagem de avaliação de incertezas proposto pelo ISO GUM. Os resultados obtidos com o sistema permitiram comprovar a sua plena funcionalidade e a eficácia dos métodos e técnicas utilizados para o processamento dos dados de entrada e realização da avaliação da incerteza.

ABSTRACT

Performance tests are important experimental activities for refrigeration compressor analysis. The main results obtained are cooling capacity, power input and coefficient of performance (COP).

Currently, the equipments used to evaluate compressor performance are specified to comply with the standard requirements. In certain applications, such as research and development activities, the uncertainty requirements can be much lower than those specified by the standards. Nevertheless, it is necessary to evaluate the measurement uncertainties whatever the accuracy required.

In that context, this dissertation aims at developing a computational tool for assessing the uncertainty of measuring chains inherent to test benches used in automated performance testing of refrigeration compressors. This tool was proposed and developed allowing the user to characterize measuring instruments and associate them on measuring chains. Therefore, automated measurement uncertainty analysis of each quantity in any measuring range or test condition was made possible. The method used to obtain the measurement uncertainty was the Monte Carlo simulation.

The validation of the developed tool was run observing whether the techniques and methodologies used were correctly implemented. In order to validate the tool, an automated testing bench was evaluated all over the quantities measured for refrigeration compressor performance characterization. The obtained results were compared to those assessed based on ISO GUM traditional uncertainty evaluation method. The results obtained by the computational tool demonstrated its full functionality and the efficacy of applied methods and techniques for processing the input data and to carry out the uncertainty assessment.

1 INTRODUÇÃO

Metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, em qualquer campo da ciência ou tecnologia e em qualquer nível de rigor metrológico (FROTA; VALCOV; CALDAS, 1999; MENDES; ROSÁRIO, 2005).

Analizando o caso da indústria de compressores para refrigeração, muitas decisões são tomadas com base em medições. Seja para satisfazer exigências de um cliente ou para desenvolver novas tecnologias, essas indústrias devem avaliar sua produção. As informações obtidas através das medições podem realimentar o desenvolvimento de produto, fornecer parâmetros para ajustes no processo, fornecer informações para dados de catálogos e atestar a conformidade de lotes de produção.

Dentre os ensaios executados no dia-a-dia, os de desempenho de compressores herméticos figuram entre os mais importantes. A sua principal finalidade é estabelecer a capacidade de refrigeração, o consumo de potência ativa e o coeficiente de performance (COP) do compressor. Tais ensaios são executados com elevada frequência dentro de uma indústria de compressores.

Normas internacionais são utilizadas para padronizar o procedimento e evitar que cada fabricante utilize seus próprios índices de desempenho. Uma das normas mais empregadas para padronização de ensaios de desempenho de compressores é a ISO 917 - *Testing of Refrigerant Compressors* (ISO, 1989). Essa norma estabelece que os resultados finais de capacidade de refrigeração, potência elétrica ativa consumida e coeficiente de performance (COP) sejam calculados com base nos dados de regime permanente. O regime permanente é caracterizado por um período contínuo de 1 h de operação, no qual variáveis específicas devem permanecer dentro de limites estabelecidos (ISO, 1989). Os valores finais de ensaio são calculados pela média dos valores medidos na última hora de ensaio.

Em uma mesma indústria de refrigeração é comum que se disponha de painéis de ensaio que pertencem a diferentes gerações. Os mais antigos são predominantemente manuais enquanto que os mais novos têm maior grau de automatização. Os do estado-da-arte utilizam arquitetura padronizada, modular, que permite alto grau de automação e de flexibilidade dos ensaios.

Freqüentemente, distintos módulos são interligados para compor sistemas de medição para atender necessidades específicas nessas bancadas de ensaio. Transdutores de diferentes tipos e características metrológicas são interligados a unidades de tratamento de sinais que, por sua vez, são conectadas a dispositivos indicadores ou registradores. Separadamente, cada módulo possui limitações metrológicas, que dão origem a erros de medição. As incertezas presentes no sinal de saída do transdutor são propagadas através da unidade de tratamento de sinais que, por sua vez, também introduz incertezas no sinal de medição. Finalmente, o sinal de medição atinge o dispositivo mostrador, ou registrador, que também deteriora o sinal de medição com os efeitos das suas imperfeições (GONÇALVES JÚNIOR; SOUSA, 2008).

O comportamento metrológico do sistema de medição, composto dessa forma, pode ser avaliado por dois caminhos: através de uma simples calibração, tratando o sistema de medição composto como um único sistema de medição; ou através de uma análise das características metrológicas individuais de cada módulo.

Esse último caminho é muito conveniente, especialmente nas fases de especificação ou de atualização de um sistema de medição, composto de vários módulos interligados, cujo desempenho do conjunto deve ser avaliado a partir de informações extraídas de catálogos de fabricantes de cada módulo. Tal método permite identificar e avaliar os pontos fracos dos sistemas de medição, de maneira que os fatores responsáveis pelas maiores incertezas do sistema fiquem explícitos. Pode-se então substituir ou acrescentar novos equipamentos para suprir ou superar os obstáculos para que seja alcançada uma menor incerteza de medição (POLETTTO, 2006).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As normas para ensaio de desempenho de compressores alternativos herméticos mais largamente empregadas pelo setor industrial são:

- ASHRAE 23-2005 (ASHRAE, 2005) – *Methods of Testing for Rating Positive Displacement Refrigerant Compressors and Condensing Units*;
- ISO 917 (ISO, 1989) – *Testing of Refrigerant Compressors*.

A norma ISO 917 estabelece nove métodos possíveis de ensaio. Cada método utiliza uma configuração distinta. Cada uma dessas configurações estabelece medições de diferentes variáveis. Sendo assim, há grande diversidade de instrumentos de medição passíveis de serem empregados.

Os equipamentos utilizados atualmente para ensaiar o desempenho de compressores de refrigeração, em geral, são dimensionados para atender às normas que regulamentam o ensaio. Em certas aplicações – pesquisa e desenvolvimento, por exemplo – as incertezas desejadas podem ser muito menores que as especificadas nas normas comumente utilizadas. No entanto, seja qual for a exatidão requerida, faz-se necessária a determinação da incerteza de medição imposta pelas cadeias de medição utilizadas para medir as grandezas de interesse.

O cenário atual das avaliações típicas de incerteza de medição em painéis de ensaios de desempenho apresenta as seguintes características:

- emprego de vários instrumentos de diferentes fabricantes utilizando linguagens diferentes em suas especificações;
- há uma grande quantidade de arquivos, gerados em diferentes plataformas de trabalho ou softwares;
- o entendimento dos cálculos realizados e sua reprodução mostram-se demorados e complicados, dificultando a reutilização de informações já disponíveis;
- há grande dificuldade para avaliação dos valores das componentes de incerteza que variam de acordo com faixas de medição e com pontos de operação;

Identificou-se, dessa forma, uma necessidade: um sistema amigável de avaliação de incertezas para bancadas automatizadas de ensaios de desempenho de compressores herméticos.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo global deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para a avaliação da incerteza das cadeias de medição utilizadas nas bancadas automatizadas de ensaios de desempenho de compressores de refrigeração. A proposta é que o usuário possa caracterizar instrumentos de medição e associá-los para configurar cadeias de medição específicas permitindo a análise da incerteza de medição para cada grandeza envolvida, ao longo de todas as faixas de medição.

A partir do contexto apresentado, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- desenvolver um sistema em software LabVIEW, para a avaliação da incerteza de medição de cadeias de medição utilizadas no ensaio de compressores;
- permitir ao usuário inserir e alterar, com extrema facilidade, a configuração da cadeia de medição, instrumentos utilizados e características dos instrumentos;
- possibilitar que o sistema seja utilizado tanto para a simples avaliação da incerteza de cadeias já montadas fisicamente quanto para auxiliar na tomada de decisão sobre novos instrumentos, facilitando a comparação de diferentes configurações.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 apresenta breves explicações sobre o ensaio de desempenho de compressores, sobre as características e importância da bancada de ensaio de desempenho de compressores, e as cadeias de medição envolvidas nos métodos de ensaio previstos em norma.

O capítulo 3 discute sobre as análises de incerteza de medição através do ISO GUM e também pela simulação de Monte Carlo, suas principais características, aplicações e limitações.

O capítulo 4 descreve o projeto e desenvolvimento do sistema computacional de avaliação da incerteza de medição, com o levantamento dos seus requisitos e funcionalidades requeridas. Em seguida, é feita uma análise do sistema

desenvolvido, discutindo sobre sua estrutura funcional, sobre o relacionamento entre os seus vários módulos de entrada e visualização dos dados.

No capítulo 5 é apresentado um exemplo de aplicação do sistema a uma bancada de ensaio de desempenho de compressores, onde é feita a comparação dos resultados obtidos frente aos obtidos por outro método de avaliação da incerteza de medição.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa.

2 ENSAIO DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES

Para determinar parâmetros inerentes aos compressores herméticos para refrigeração, existem diversos ensaios que podem ser aplicados. Entre eles estão os ensaios de desempenho.

Nesta dissertação são abordados os ensaios de desempenho baseados na norma ISO 917 - *Testing of Refrigerant Compressors* (ISO, 1989). Essa norma, bem como outras semelhantes, busca estabelecer procedimentos padronizados para avaliação e determinação de características do compressor, tornando possíveis as reproduções de resultados e comparações entre diferentes fabricantes.

A norma ISO 917 (ISO, 1989) estabelece nove métodos de ensaio, sendo que cada método possui diferentes configurações de circuitos mecânicos e sistemas de medição. Cada uma dessas configurações estabelece medições de diferentes variáveis e o fim de um ensaio por um método é dado pela permanência do conjunto de variáveis em regime permanente durante o período de uma hora. Essa condição é estabelecida por norma e basicamente garante que os valores obtidos por esses ensaios possam ser comparados e reproduzidos. Uma hora em regime permanente pretende garantir que uma condição específica de operação foi atingida.

2.1.1 Normas

Em relação às duas normas mais comumente utilizadas nos ensaios de desempenho de compressores, a ISO 917 (ISO, 1989) e a ASHRAE 23-2005 (ASHRAE, 2005), ambas mencionam as possíveis configurações que podem ser usadas para testar os compressores, os limites máximos relativos às incertezas de

medição para cada transdutor utilizado e, em alguns casos, faixas nas quais uma determinada variável deve permanecer confinada durante o ensaio do compressor.

Uma orientação comum das duas normas é que a medida de vazão deve ser realizada duas vezes, simultaneamente e por sistemas de medição independentes (método X e método Y), para que, no final do ensaio, os resultados possam ser comparados.

A norma ASHRAE 23-2005 (ASHRAE, 2005) permite que os métodos empregados no ensaio sejam os mesmos, desde que operem independentemente, enquanto a ISO 917 (ISO, 1989) sugere que os métodos sejam diferentes. A norma ISO 917 (ISO, 1989) exige que no mínimo dois métodos de ensaio sejam executados simultaneamente e que a diferença entre os resultados não ultrapasse $\pm 4\%$.

Quanto aos transdutores a serem utilizados na bancada de ensaio de compressores, cada norma impõe alguns requisitos a serem cumpridos. A norma ASHRAE 23-2005 (ASHRAE, 2005) especifica os medidores em função de seu erro máximo, enquanto a norma ISO 917 (ISO, 1989) de seu desvio padrão. Esses valores foram transcritos das respectivas normas e estão listados na tabela 2.1.

Os valores apresentados por limites do desvio padrão das medições, mesmo não sendo a forma indicada pelo Guia para a Expressão da Incerteza de Medição da ISO (INMETRO, 2003), é a representação de incerteza - pelo desvio padrão - estabelecida pela norma ISO 917 (ISO, 1989).

Tabela 2.1 - Requisitos das normas

	ISO 917	ASHRAE 23-2005
	Desvio padrão	Erro máximo
Grandeza		
diferença de temperaturas		$\pm 1.0\%$ da diferença
temperatura de fluido ou água em calorímetros ou condensadores	0.06 K	± 0.3 K
demais temperaturas	0.3 K	± 0.3 K
pressão de sucção	1.0%	$\pm 1.0\%$ do valor lido
demais pressões	2.0%	$\pm 1.0\%$ do valor medido
fluxo de massa (fase líquida)	1.0%	$\pm 1.0\%$ do valor medido
fluxo de massa (fase gasosa)	2.0%	$\pm 1.0\%$ do valor medido
potência elétrica	1.0%	$\pm 1.0\%$ do valor medido

Em relação ao funcionamento da bancada na qual o ensaio do compressor é realizado, as normas especificam faixas às quais cada variável deve se restringir. A tabela 2.2 fornece os valores retirados das respectivas normas.

Tabela 2.2 - Limites de variação

Norma	ISO 917	ASHRAE 23-2005
Grandeza	limites de operação	
tensão de alimentação	$\pm 3.0\%$ do valor especificado	$\pm 1.0\%$ do valor especificado
freqüência de alimentação	$\pm 1.0\%$ do valor especificado	
pressão de sucção	$\pm 1.0\%$ do valor especificado	$\pm 1.0\%$ do valor especificado
pressão de descarga	$\pm 1.0\%$ do valor especificado	$\pm 1.0\%$ do valor especificado
demais pressões	$\pm 1.0\%$ do valor especificado	
temperatura de sucção		± 1.0 K
temperatura ambiente do compressor		± 4.0 K
demais temperaturas	± 3.0 K	± 3.0 K
número mínimo de medidas	4	3
tempo de teste	1 h	
volume específico do refrigerante na sucção	$\pm 2.0\%$ do valor especificado	
flutuações nas potências entregues ao calorímetro ou ao condensador não devem variar a capacidade do compressor mais que	$\pm 1.0\%$	
perdas em calorímetros ou condensadores	5% da capacidade	

2.1.2 Objetivos do ensaio

Vários são os resultados dos ensaios de desempenho de compressores, porém os resultados de maior importância são a capacidade de refrigeração, a potência consumida pelo compressor e o coeficiente de performance (COP).

- **Capacidade de refrigeração (Φ_0):** é o produto do fluxo de massa de refrigerante através do compressor e a diferença entre a entalpia específica do refrigerante na entrada (sucção) e a entalpia específica de líquido saturado na temperatura correspondente à pressão de descarga na saída do compressor (ISO, 1989). Em outras palavras a capacidade de refrigeração é

uma medida da capacidade do compressor de gerar vazão mássica de refrigerante frente a um diferencial de pressão imposto entre as tomadas de sucção e descarga do compressor. A unidade da capacidade de refrigeração no SI é o watt. Entretanto, outras unidades são largamente utilizadas no mercado de refrigeração: BTU/h e kcal (STOECKER; JABARDO, 2002).

- **Potência elétrica ativa consumida (P):** é a potência nos terminais do compressor hermético, sendo composta pelo consumo do motor e de elementos auxiliares necessários para manter o compressor em operação. Essa característica também é expressa em watt.
- **Coeficiente de performance (COP):** é a razão da capacidade de refrigeração pela potência consumida pelo compressor (ISO, 1989). O coeficiente de performance é adimensional.

O método de determinação dos parâmetros citados acima pode ser aplicado em ensaios de controle de qualidade, nos quais patamares mínimos e máximos são estabelecidos e a amostra deve se encaixar nessa faixa, ou em ensaios de pesquisa e desenvolvimento, para identificar e quantificar melhorias devido a mudanças construtivas ou de projeto. Geralmente as exigências metrológicas concernentes às aplicações em pesquisa e desenvolvimento são muito superiores às atinentes ao controle de qualidade.

2.2 BANCADA DE ENSAIOS DE DESEMPENHO DE COMPRESSORES

De acordo com a norma ISO 917 (ISO, 1989), os ensaios de desempenho devem ser realizados em bancadas especiais, capazes de reproduzir diferentes condições de operação e realizar diversas medições. Nessas bancadas existem duas tarefas principais envolvidas, as operações de controle e as operações de medição (HENKLEIN, 2006).

As ações de controle buscam simular as condições reais de operação de um compressor, direta e indiretamente. A bancada deve possuir todos os controladores, atuadores e medidores para que a malha de controle seja eficiente no ajuste das variáveis controladas aos limites estabelecidos pela norma (HENKLEIN, 2006).

Existem vários métodos para realizar os ensaios e cada um estabelece diferentes medições em diferentes pontos do circuito, porém a estrutura física que realiza o controle das variáveis é basicamente a mesma. A figura 2.1 exemplifica uma configuração de circuito de bancada.

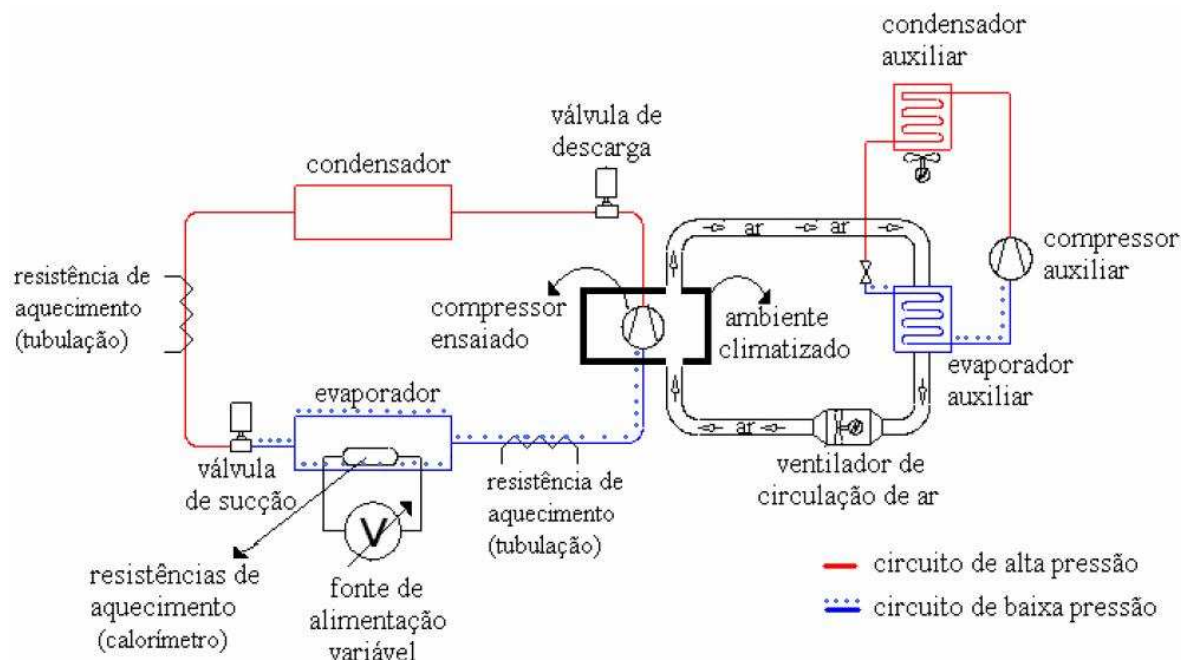


Figura 2.1 - Bancada de ensaio de compressores (HENKLEIN, 2006)

Na figura 2.1 pode-se ver que existem dois circuitos de refrigeração envolvidos, um para o compressor ensaiado e outro para realizar a climatização do ambiente do compressor, contando com um condensador auxiliar, um compressor auxiliar, um evaporador auxiliar, uma válvula de expansão e uma tubulação para direcionamento do ar frio (HENKLEIN, 2006).

Vários atuadores podem ser vistos na figura 2.1, como resistores de aquecimento e válvulas de ajuste de pressão, que servem para impor a condição de operação, na qual é observado o desempenho do compressor. Vale salientar que, dependendo do ponto de operação, o compressor possui um comportamento diferente, podendo ter capacidade de refrigeração e consumo de potência maiores ou menores (STOECKER; JABARDO, 2002).

Um ensaio desenvolvido de acordo com a norma ISO 917 (ISO, 1989) deve ter um conjunto de parâmetros mantido dentro de limites. As variáveis medidas e controladas são:

- pressão de descarga;
- pressão de sucção;
- temperatura da sucção;
- tensão elétrica da alimentação do compressor;
- temperatura e velocidade do fluxo de ar em torno do compressor;
- temperatura do separador de óleo;
- temperatura interna ao trocador de calor (evaporador);
- temperatura externa ao trocador de calor (evaporador);
- vazão e temperatura da água de condensação;
- potência elétrica entregue ao evaporador;
- subresfriamento do fluido refrigerante na entrada do trocador.

As variáveis somente medidas são:

- temperatura do corpo do compressor;
- potência elétrica entregue ao compressor;
- resistência do enrolamento do compressor;
- corrente elétrica do compressor;
- frequência rotacional.

Depois da partida do compressor, a bancada de ensaios inicia o processo de controle para que as variáveis atinjam os valores da condição de operação em que o compressor está sendo testado. Enquanto esses valores não estiverem continuamente dentro dos limites de variação em torno do valor de referência, o ensaio estará no transitório. Uma vez o compressor operando em regime permanente, as medições devem ser realizadas em intervalos equidistantes de no máximo 20 minutos, durante pelo menos 1 hora (STEINBACH, 2008).

Os procedimentos estabelecidos pela norma ISO 917 (ISO, 1989) são gerais para todas as condições de operação, sendo que, para cada condição são estabelecidos valores diferentes para pressão absoluta de descarga e sucção, temperatura de sucção e frequência rotacional. As demais variáveis independem da condição de ensaio.

2.2.1 Configurações de Sistemas de Medição

Há diversas configurações capazes de realizar o ensaio de um compressor de refrigeração. O que as diferencia é o método usado para medir a vazão mássica de refrigerante (POLETTI, 2006).

Os pontos de medição e as condições de ensaio são estabelecidos por norma e separados por métodos de ensaio. Destes, alguns podem coexistir, ou seja, é viável fazer mais de uma medição ao mesmo tempo. Contudo, existem alguns métodos que não podem ser implementados simultaneamente a outros (ISO, 1989), como mostrado na tabela 2.3:

Tabela 2.3 - Combinações de métodos (ISO, 1989)

Método primário	Métodos permitidos
A	D1, D2, F, G, K
B	D1, D2, F, G, K
C	D1, D2, F, G, K
D1	A, B, C, D2, F, G, J, K
D2	A, B, C, D1, F, J
F	A, B, C, D1, D2, J, K
G	A, B, C, D1, F, J
J	D1, D2, F, G, K
K	A, B, C, D1, F, J

Onde:

- método A – balanço de energia no calorímetro com fluido secundário;
- método B – balanço de energia no calorímetro inundado;
- método C – balanço de energia no calorímetro a seco;
- métodos D1 e D2 – medição de vazão mássica de vapor de refrigerante;
- método F – medição de vazão mássica de refrigerante líquido;
- método G – balanço de energia no condensador;
- método J – balanço de energia na mistura do refrigerante condensado ao não condensado;
- método K – balanço de energia no calorímetro na linha de descarga.

Em todos os métodos são necessários alguns dispositivos capazes de manipular as condições de contorno do ensaio em torno do compressor: pressões de entrada e saída, bem como a temperatura de entrada do refrigerante no compressor. Existem diversas maneiras de controlar os parâmetros em questão, sendo as formas mais comuns o uso de válvulas e o controle da troca de calor no condensador.

2.2.2 Cadeias de Medição Envolvidas e Grandezas de Interesse

Basicamente, a função desempenhada pelas cadeias de medição é a geração de informação quantitativa das grandezas envolvidas em ensaios (grandezas elétricas, temperatura, pressão, fluxo de massa, fluxo de água).

A aquisição de sinais se dá de forma analógica e também através de interfaces digitais. A aquisição analógica é na forma de tensão, oriunda de transdutores e transmissores (pressão, temperatura, *shunts*, turbina, *encoders* etc). As interfaces digitais, utilizadas por alguns transmissores, são CAN e RS-485.

Uma nova arquitetura de bancada de ensaio de desempenho de compressores, baseada em resultados dos trabalhos de Poletto (2006), Flesch (2006), Scussel (2006) e Barbosa (2006), foi proposta no trabalho de mestrado realizado por Petrovcic (2007). Trata-se de uma arquitetura não proprietária focada na modularização, flexibilidade, alto grau de automação e padronização. É apresentada na figura 2.2 a configuração geral deste sistema proposto.

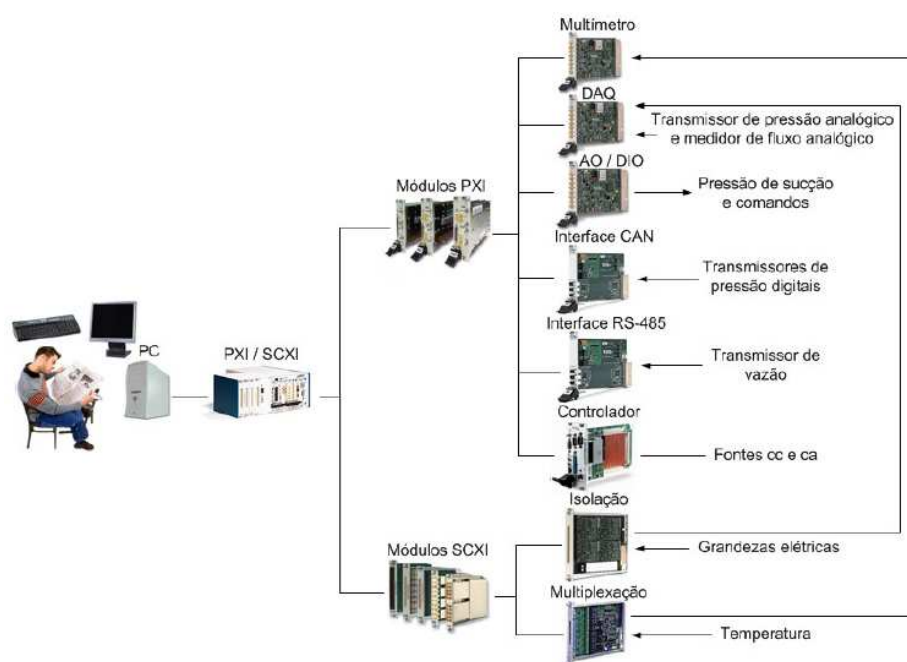


Figura 2.2 - Configuração geral do sistema (PETROVCIC, 2007)

As grandezas envolvidas na nova bancada de ensaio são temperaturas, pressões, vazão mássica, vazão volumétrica, correntes CA e CC e tensões CA e CC.

2.2.2.1 Temperatura

São realizadas 18 medições de temperatura. Dessas 18 medições, uma é realizada internamente pelo próprio transmissor de vazão de fluido refrigerante que está integrado ao sistema. As demais 17 medições são realizadas utilizando-se termorresistores do tipo Pt100 classe A.

A medição é realizada a 4 fios. Esse tipo de medição permite uma menor incerteza, já que é compensada a queda de tensão nos fios utilizados para a medição. Algumas medições podem ser feitas a 2 fios ou através de laço de corrente (medições secundárias, não previstas em norma, como temperatura do separador de óleo e temperatura da água de resfriamento). Os fios são conectados a um módulo que multiplexa as entradas para uma saída que é lida por um multímetro PXI.

As medições de temperatura são realizadas nos seguintes pontos:

- entrada do compressor;
- água de sucção;
- saída do compressor;
- entrada do calorímetro;
- saída do calorímetro;
- ambiente do compressor: duas medições;
- ambiente do calorímetro: duas medições;
- superfície do compressor: duas medições;
- superfície do calorímetro: quatro medições;
- entrada do medidor de vazão mássica: medido pelo próprio medidor de vazão;
- separador de óleo;
- água de entrada da bancada;
- água do condensador.

2.2.2.2 Pressão

São realizadas 8 medições de pressão, sendo 7 através de transmissores digitais e somente 1 através de transmissor analógico. Os transmissores digitais utilizam interface CAN enquanto que o analógico possui saída de (0 a 10) V. Ambos os casos dispensam o condicionamento de sinal e, somente no último, há a necessidade de conversão A/D.

As medições de pressão estão subdivididas em três faixas de medição diferentes:

(0 a 1) bar

- sucção do compressor: é realizada a aquisição através do transmissor com interface CAN. O sinal de saída é adquirido com interface PXI CAN;
- processo do compressor: idem sucção do compressor;
- saída do calorímetro: idem sucção do compressor.

(0 a 3) bar

- sucção do compressor: é realizada a aquisição através do transmissor com interface CAN. O sinal de saída é adquirido com interface PXI CAN;
- processo do compressor: idem sucção do compressor;
- saída do calorímetro: idem sucção do compressor.

(0 a 10) bar

- entrada do calorímetro: é utilizado o transmissor com interface CAN;
- descarga do compressor: é utilizado um transmissor com saídas analógica e digital RS-485. Assim sendo, utiliza-se a saída digital (RS-485) para as medições de pressão para fins de controle, entrando numa porta serial do PXI. Usa-se a saída analógica para as medições de pressão (utilizadas na medição de rotação), entrando o sinal numa das entradas da DAQ/PXI.

2.2.2.3 Vazão

São realizadas duas medições de vazão, uma de água de refrigeração e outra de fluido refrigerante.

Vazão mássica de refrigerante: é realizada através de um transmissor de vazão com interface de comunicação RS-485 baseado no princípio Coriolis.

Vazão mássica de água: a medição de vazão mássica de água é realizada utilizando-se uma turbina, com sinal de saída de (0 a 10) V.

Ambas as medições dispensam condicionamento do sinal e somente no último caso há a necessidade de conversão A/D.

2.2.2.4 Grandezas Elétricas

As grandezas elétricas dessa bancada são caracterizadas pela potência CA de alimentação do compressor e pela potência CC entregue ao evaporador.

A potência CA é calculada através do produto das medições instantâneas de tensão CA e corrente CA. A medição de tensão CA é realizada através de um divisor de tensão que condiciona sinais com valor eficaz de (85 a 264) V para a faixa bipolar de ± 10 V. A tensão medida em um dos resistores do divisor vai para o PXI através de um módulo de isolamento.

A medição de corrente CA é realizada através de dois *shunts* para se optar entre duas faixas de medições. Os *shunts* condicionam sinais com valor eficaz de (0,2 a 5,0) A para a faixa bipolar de $\pm 0,5$ V. O sinal proveniente de cada *shunt* entra, através de um módulo de isolamento, no PXI.

A potência CC é calculada com base no produto das medições de tensão CC e corrente CC. A medição de tensão CC também é realizada através de um divisor de tensão que condiciona sinais de (28 a 300) V para a faixa de (0 a 10) V. A tensão medida em um dos resistores do divisor vai para o PXI através de um módulo de isolamento.

A medição de corrente CC é realizada através de dois *shunts* que condicionam o sinais de (0,35 a 5) A para a faixa de medição de (0 a 0,5) V. O sinal proveniente de cada *shunt* entra, através de um módulo de isolamento, no PXI.

No presente capítulo foram tratados os assuntos relativos aos ensaios de desempenho e a aplicação das bancadas de ensaio de desempenho na medição das grandezas de interesse. Também foi apresentada a configuração ou arquitetura desses painéis e as cadeias de medição envolvidas. No capítulo seguinte é feita uma revisão bibliográfica sobre dois métodos de avaliação da incerteza de medição passíveis de serem aplicados a painéis de ensaio de desempenho de compressores.

3 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Todas as medições estão sujeitas a incertezas. Incerteza é uma indicação quantitativa da qualidade do resultado de uma medição, habilitando a medida resultante a ser comparada com os outros resultados, referências, especificações ou padrões e, dessa forma, conferir-lhe rastreabilidade (HOWART; REDGRAVE, 2008; THEISEN, 1997).

Em 1977, reconhecendo a falta de consenso internacional em como estimar o valor de uma incerteza, o Comitê Internacional de Peso e Medidas (CIPM) solicitou ao Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) que tratasse o problema em conjunto com os laboratórios nacionais de metrologia e que fizesse uma recomendação normativa para tratar do assunto. Como resultado, em 1993, foi editado o Guia para a Expressão de Incerteza de Medição, conhecido como ISO GUM (INMETRO, 2003). O método apresentado pelo ISO GUM estabelece regras gerais para avaliar e expressar a incerteza de medição, podendo ser aplicado do chão de fábrica à pesquisa fundamental (BICH; COX, 2006; HOWART; REDGRAVE, 2008).

Com base no ISO GUM (INMETRO, 2003), vários documentos específicos foram criados para orientar e adequar seu conteúdo às seguintes áreas: calibrações (documento EA-4/02 – *European Accreditation*); química analítica (Guia EURACHEM – *Europe Analytical Chemistry*); ensaios mecânicos (UNCERT – *National Physical Laboratory*) e ambiental fabril (ISO/TS 14253-3 – *Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measurement equipment – Part 3: Guidelines for achieving agreements on measurement uncertainty statements*) (HOWART; REDGRAVE, 2008).

O método de avaliação de incertezas proposto pelo ISO GUM (INMETRO, 2003) é baseado na propagação de incertezas (desvios padrão) através do modelo matemático da medição. Apesar de representar um consenso da comunidade internacional na prática de expressão da incerteza de medição, constituindo-se

assim no método de referência para avaliação de incerteza, o método apresenta algumas peculiaridades que atentam contra sua difusão e correta aplicação. Dentre outras, destacam-se as seguintes (KONRATH; DONATELLI, 2005):

- complexidade conceitual;
- necessidade de construção de um modelo matemático da medição;
- utilização de conceitos de probabilidade e estatística nem sempre claros para os profissionais de diversas áreas;
- além disso, em sua formulação mais usual, o método de propagação de incertezas requer o atendimento de certas condições de validade, tais como a linearidade do modelo e a normalidade da distribuição da variável aleatória que representa os valores possíveis do mensurando. Assim, sua aplicabilidade não é tão ampla como seria desejada.

Esses empecilhos associados à aplicabilidade e à validade do método tradicional de avaliação da incerteza de medição têm impellido o surgimento de técnicas alternativas, mas consistentes com o ISO GUM (INMETRO, 2003), para esse propósito. Dentre essas, está a aplicação da simulação de Monte Carlo (SMC) para avaliar incertezas de medição (COX; SIEBERT, 2006; KONRATH; DONATELLI, 2005).

3.1 MÉTODO CLÁSSICO OU DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

O princípio do ISO GUM consiste em demonstrar que a incerteza global da medição incorpora diversas fontes de incerteza, que surgem de efeitos sistemáticos e aleatórios. A implementação desse princípio parte da análise do modelo matemático da medição (função de medição) que inclui todas as contribuições relevantes para a medição. A incerteza global é então estimada pela lei da propagação da incerteza, seguindo a identificação e a quantificação da incerteza individual dos fatores de influência (BICH; COX; HARRIS, 2006).

Tal lei afirma que a incerteza de cada fator de influência da medição é propagado para a incerteza final da medição através de uma expansão de primeira ordem da série de Taylor. Assume-se, através da aplicabilidade do Teorema do Limite Central, que a distribuição de probabilidade para o resultado da medição

seguirá um modelo de distribuição do tipo normal, ou t-Student para pequenas amostras.

A incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns desses componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados por desvios padrão experimentais. Outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios padrão, são avaliados por meio de distribuições de probabilidade assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações.

Segundo o ISO GUM (INMETRO, 2003), existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo:

- realização imperfeita ou incompleta da definição do mensurando;
- amostragem não representativa do mensurando definido;
- conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- erro de tendência pessoal na leitura de equipamentos analógicos;
- resolução finita do equipamento ou limiar de mobilidade;
- valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Com base nas grandezas de entrada citadas anteriormente, pode-se observar a importância da adequada caracterização do processo de medição. Cada grandeza acrescenta um componente de incerteza ao resultado da medição e todas devem ser convenientemente consideradas e combinadas para que se obtenha uma estimativa realista da incerteza do processo de medição. O tratamento dado às grandezas de entrada possibilita chegar a um valor para a estimativa da incerteza de medição. Conforme mostrado na figura 3.1, o método de estimativa da incerteza de medição pode ser subdividido em quatro etapas.

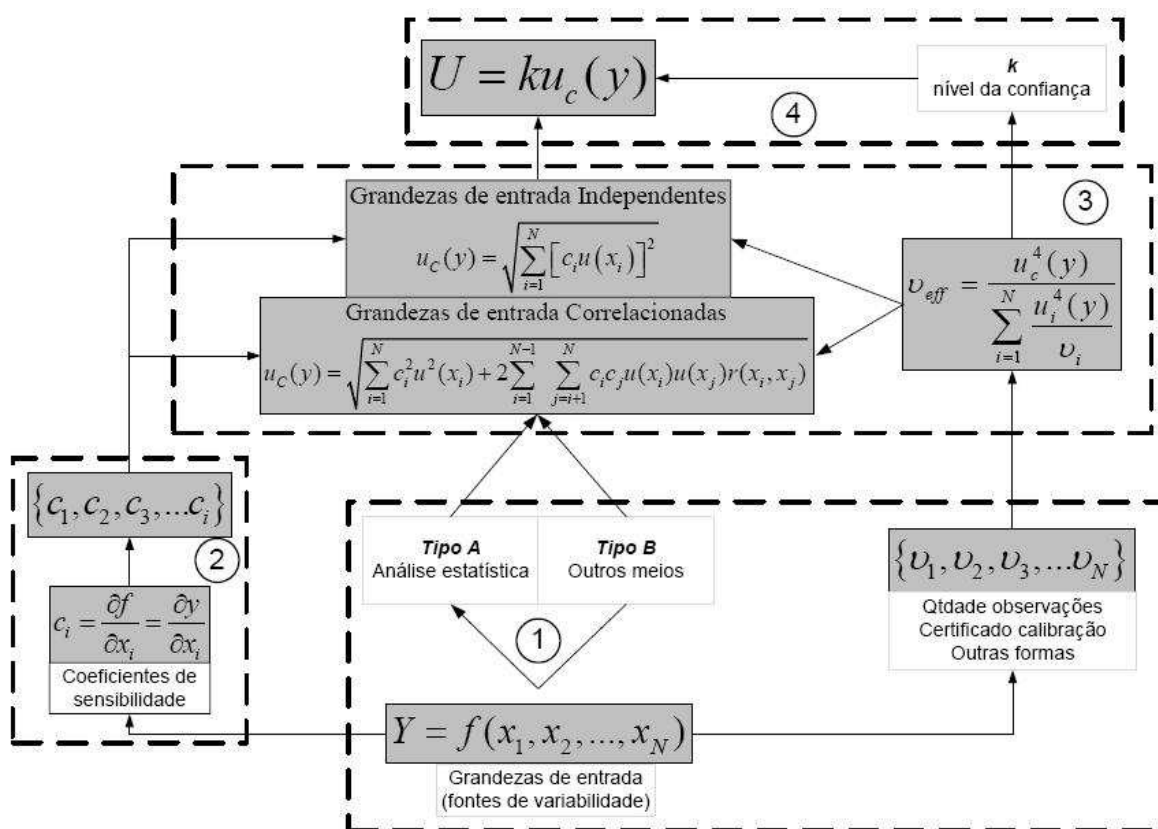


Figura 3.1 - Diagrama do método de estimativa da incerteza de medição
(PIZZOLATO, 2006)

Etapa 1- Definição das grandezas de entrada: Definir as grandezas de entrada (x_1, x_2, \dots, x_N) a considerar para que se obtenha a estimativa da incerteza de medição, determinando a forma como elas se relacionam, ou seja, o modelo matemático que rege a variabilidade do processo de medição que está sendo realizado. Para cada grandeza determina-se a distribuição de probabilidade que representa seu comportamento, bem como seus respectivos graus de liberdade ($v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$).

Levar em consideração que as grandezas de entrada podem ser obtidas através de meios estatísticos, com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições – avaliação de incerteza do tipo A – e, ainda, obtidas por outros meios não estatísticos, avaliados por meio de distribuições de probabilidade assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações (por exemplo, *datasheets* e certificados de calibração) – avaliação de incerteza do tipo B.

É nesta etapa que se verifica o relacionamento das grandezas de entrada, ou seja, se elas são independentes ou correlacionadas. A combinação dessas grandezas, realizada na etapa 3, é diferente de acordo com o tipo de relacionamento existente entre elas.

Etapa 2 - Determinação dos coeficientes de sensibilidade: Determinar o coeficiente de sensibilidade (c_1, \dots, c_N) que descreve como a estimativa de saída y varia com as alterações nos valores das estimativas de entrada (x_1, x_2, \dots, x_N). É necessário o cálculo das derivadas parciais do modelo matemático - função de medição - que descreve o processo de medição em relação a cada uma das grandezas de entrada. Nesta etapa também se pode verificar quanto cada fonte de incerteza contribui para a incerteza global do ensaio ou calibração.

Etapa 3 - Cálculo da incerteza padrão combinada: Calcular a incerteza padrão combinada (u_c), considerando todas as fontes de incerteza, como um desvio padrão. A incerteza padrão combinada é uma combinação de diferentes distribuições de probabilidade das grandezas de entrada (desde que elas sejam independentes), fundamentada no teorema do limite central. Desse modo, se faz necessário calcular seus graus efetivos de liberdade (ν_{eff}).

Etapa 4 - Cálculo da incerteza expandida: Calcular a incerteza expandida (U), que é a incerteza da medição. Consiste em obter um valor de incerteza que possua uma maior probabilidade de abrangência na estimativa. É determinado através do produto da incerteza padrão combinada por um fator de abrangência k , calculado a partir dos graus de liberdade efetivos (ν_{eff}) e da probabilidade de abrangência desejada (tipicamente 95%).

3.2 MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO OU DA PROPAGAÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES

Segundo o ISO GUM (INMETRO, 2003), outras técnicas que não aquelas estabelecidas pelo próprio guia podem ser aceitas quando os requisitos para aplicação desse método não são satisfeitos. Nesse sentido, podem ser utilizados métodos analíticos ou numéricos, o que é o caso da simulação de Monte Carlo (SMC).

A simulação de Monte Carlo é um método probabilístico baseado na aleatoriedade que, através de tentativas experimentais, pode resolver problemas estocásticos. O método começou a ser difundido com o advento do computador, pois a simulação de Monte Carlo requer a geração de uma grande quantidade de números aleatórios (BICH; COX; HARRIS, 2006).

A simulação de Monte Carlo se apresenta como um método alternativo eficaz para os casos em que a aplicação dos procedimentos propostos pelo ISO GUM (INMETRO, 2003) é inadequada ou muito complexa. Um documento suplementar ao ISO GUM a respeito da utilização da simulação de Monte Carlo para o cálculo da incerteza de medição foi publicado pelo *Joint Committee for Guides in Metrology – JCGM*, o *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) – Supplement 1: Numerical Methods for the Propagation of Distributions* (ISO, 2008).

O método de Monte Carlo utiliza o conceito de propagação das distribuições de probabilidade das grandezas de entrada, e não a propagação das incertezas das grandezas de entrada, como preconiza o método do ISO GUM (INMETRO, 2003). A figura 3.2 ilustra este conceito empregado na simulação de Monte Carlo, o qual consiste, primeiramente, em assumir distribuições de probabilidade apropriadas (como retangular, normal, triangular, entre outras) para as fontes de incerteza de medição.

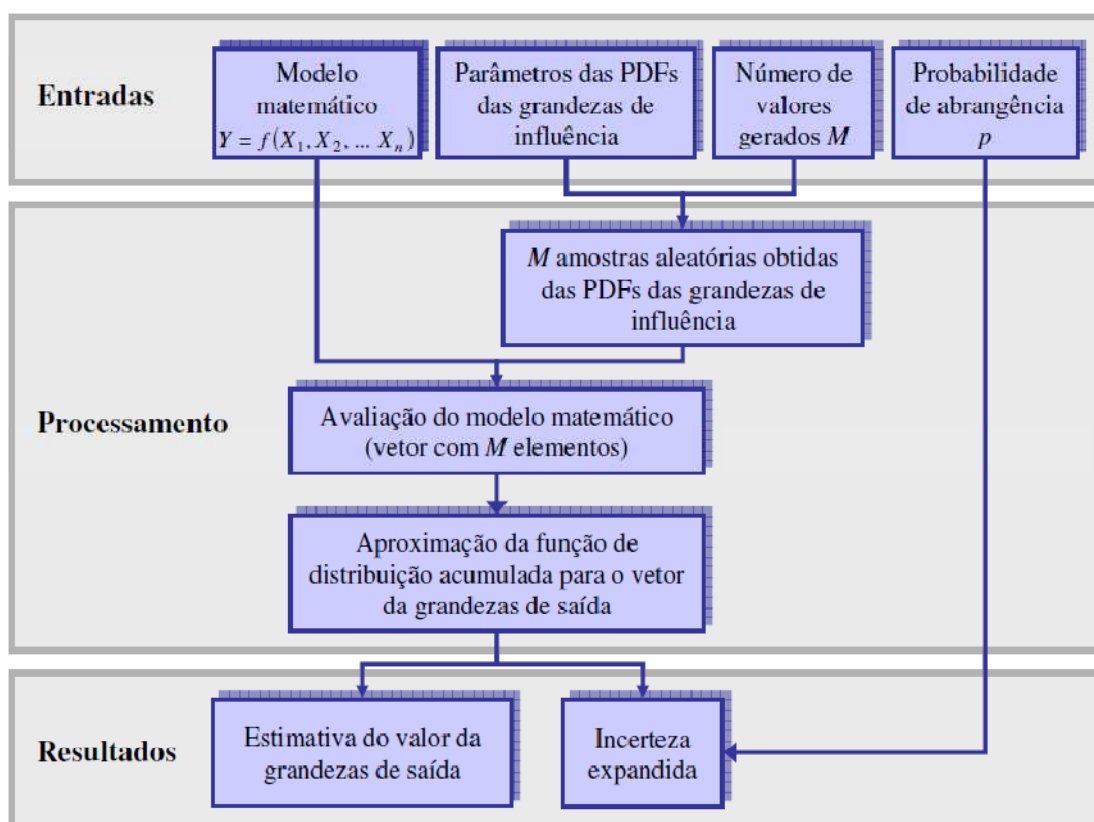


Figura 3.2 – Fluxograma simplificado da avaliação de incerteza de medição usando o método de simulação de Monte Carlo (KONRATH; DONATELLI, 2005)

Essas distribuições são, então, propagadas através da equação da medição, e os valores para a média e desvio padrão dos resultados são estimados. A incerteza

do ensaio ou da calibração será calculada de acordo com um determinado nível de confiança desejado, após um grande número de repetições executadas. Dessa forma, a distribuição da grandeza de saída não é assumida a priori, como acontece no método do ISO GUM, mas calculada a partir das distribuições de probabilidade das grandezas de entrada (BICH; COX; HARRIS, 2006; KACKER, 2006).

Outra importante utilidade da simulação de Monte Carlo consiste na possibilidade de validação dos cálculos executados pelo método do ISO GUM (INMETRO, 2003). A lei da propagação da incerteza proposta pelo ISO GUM tende a funcionar plenamente na maioria dos casos. Contudo, é complexo quantificar os efeitos das aproximações envolvidas, tais como, a não linearização do modelo matemático, a inaplicabilidade da fórmula de Welch-Satterthwaite e a distribuição não normal da grandeza de saída. Nesse sentido, quando houver dúvidas com relação à adequação do método do ISO GUM, os cálculos devem ser validados de alguma forma. A simulação de Monte Carlo pode ser uma alternativa para validar tais cálculos, já que a propagação de distribuições é uma generalização da lei de propagação de incertezas (ISO, 2008).

Como vantagem do método, os procedimentos adotados pela simulação de Monte Carlo dispensam os cálculos das derivadas parciais da função de medição em relação às grandezas de entrada, o que em muitos casos pode ser um fator de complicada obtenção. Além disso, o método dispensa a atribuição de graus de liberdade para as fontes de incerteza.

Em qualquer das duas abordagens (ISO GUM e SMC), o valor calculado da incerteza pode ser inferior ao real, em função da omissão de algumas fontes de incerteza que influenciam na variabilidade do resultado da medição.

Observa-se que a SMC se constitui numa alternativa válida ao método clássico, aplicável em qualquer caso prático, mas especialmente indicada a casos em que as condições de aplicabilidade do método clássico são violadas, tais como:

- o modelo matemático da medição apresenta uma acentuada não-linearidade;
- a distribuição de probabilidade da grandeza de saída se afasta significativamente da normal;

O método da SMC também é particularmente útil quando modelos matemáticos complexos estão envolvidos, nos quais é difícil ou inconveniente determinar as

derivadas parciais exigidas pelo método clássico, ou quando a grandeza medida não pode ser explicitamente expressada em função das grandezas de influência.

Cabe salientar também que o uso de ferramentas computacionais no âmbito da metrologia científica e industrial tem sido cada vez mais aceito. As atividades metrológicas têm sido fortemente beneficiadas pela aquisição de dados e o processamento de resultados via computador, com a conseqüente redução do trabalho rotineiro e dos erros grosseiros, aspectos estes inevitáveis quando grandes quantidades de números precisam ser manipuladas. As ferramentas computacionais são bem aceitas pelos organismos de acreditação de laboratórios segundo a norma ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005), e pelas certificadoras de sistemas da qualidade (ex. ISO 9000 e ISO/TS 16949) (KONRATH; DONATELLI, 2005). Adicionalmente, a rápida evolução dos computadores tem disponibilizado aos metrologistas das indústrias e de laboratórios poderosas ferramentas de cálculo, que viabilizam a execução da SMC a um custo razoável e em tempos compatíveis com a dinâmica do serviço metrológico.

A combinação das vantagens da SMC com a evolução dos meios computacionais de processamento de dados indica que a SMC pode vir a ser, no futuro, a técnica preferida para a avaliação de incertezas de medição, substituindo total ou parcialmente o método de propagação de incertezas. Seguramente, técnicos e engenheiros que atuam na metrologia estariam de acordo com essa perspectiva, uma vez que a simulação é muito mais intuitiva que a tradicional combinação de incertezas. Entretanto, é necessário desenvolver uma sistemática que permita minimizar o tamanho da amostra, porém, sem comprometer a qualidade dos resultados da simulação, para que os objetivos da análise possam ser atendidos.

Existe um grande empecilho à aplicação massiva da SMC que parece difícil de superar. Um balanço de incerteza clássico, realizado segundo o método de propagação de incertezas, permite individualizar o efeito de cada contribuição para a incerteza. Assim, torna-se simples identificar as contribuições dominantes e agir nelas para diminuir a incerteza da medição. Em contrapartida, a SMC não realiza explicitamente derivadas da variável de saída a respeito das grandezas de influência. Conseqüentemente, a importância relativa das diferentes contribuições fica menos evidente aos olhos do analista, limitando sua capacidade de induzir melhorias no processo (KONRATH; DONATELLI, 2005).

4 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS

4.1 REQUISITOS DO SISTEMA

O software é destinado ao cálculo da estimativa da incerteza de medição de painéis de ensaio de desempenho de compressores. Isso é feito através da montagem de cadeias de medição utilizadas na medição de grandezas específicas, informando as características metrológicas de cada componente que compõe a cadeia, bem como a relação existente entre eles, ou seja, a função de medição. O sistema possibilita a comparação entre diferentes montagens de cadeias de medição, permitindo o julgamento técnico e de viabilidade de uma configuração específica. A figura 4.1 apresenta, de forma sucinta, a sistemática de utilização do sistema de simulação.

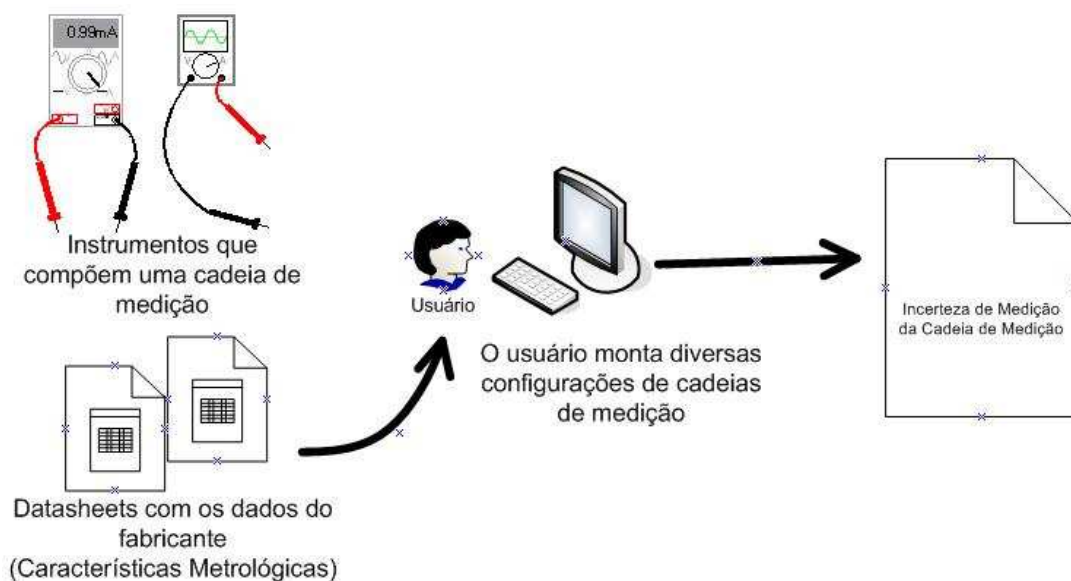


Figura 4.1 - Sistemática de uso do sistema de simulação

O sistema é direcionado a usuários com formação em metrologia e instrumentação, envolvidos em projetos e em especificações de módulos constituidores de bancadas automatizadas de ensaios de desempenho de compressores de refrigeração. Pressupõe-se que os usuários do sistema sejam profissionais que possuem um bom conhecimento em metrologia e instrumentação e que saibam interpretar as especificações (*datasheets*) dos fabricantes dos instrumentos.

4.1.1 Requisitos do Sistema

Foram estabelecidos alguns requisitos que devem ser atendidos no desenvolvimento de uma solução que permita atingir os objetivos traçados para o trabalho:

- a) aplicabilidade a bancadas automatizadas de ensaios de desempenho de compressores de refrigeração;
- b) capacidade de apresentar resultados confiáveis de incertezas de medição;
- c) aplicação de método padronizado – Monte Carlo – para avaliação da incerteza;
- d) facilidade operacional e de visualização de resultados, exigindo o mínimo de operações matemáticas externas ao sistema de simulação;
- e) facilidade de reconfiguração das cadeias de medição pela troca de características de equipamentos ou mesmo a substituição total ou parcial da cadeia;
- f) flexibilidade para alteração da função de medição correspondente à cadeia de medição associada a cada mensurando;
- g) facilidade de alteração de pontos de operação ao longo das faixas de medição dos diferentes instrumentos simulados;
- h) máxima compatibilização com a terminologia estabelecida pelo Vocabulário Internacional de Metrologia – VIM (INMETRO, 2007);
- i) desenvolvimento em LabVIEW, para facilitar a integração do sistema de avaliação da incerteza de medição nas bancadas reais de ensaios.

Além disso, a fim de atender os objetivos definidos na seção 1.2 , as seguintes características devem ser consideradas:

- interfaces simples e auto-explicativas, para serem compreendidas por usuários com alguma experiência em manejo de computador;
- facilidade na entrada dos dados dos instrumentos;
- flexibilidade para a montagem de diversas cadeias de medição;
- possibilidade de definir o encadeamento dos módulos;
- definição do valor de entrada de cada módulo em separado;
- a partir do valor de entrada, poder fazer a seleção da faixa de medição a ser utilizada;
- total integração com outros softwares desenvolvidos em outros trabalhos de mestrado, o que propicia uma completa análise da incerteza de medição em bancadas de ensaio de compressores;

Assumindo as propostas referentes à finalidade e ao tipo de usuário do sistema, e também todos os demais requisitos apresentados, foram identificados três elementos principais que devem ser implementados na solução proposta, ilustrados na figura 4.2.

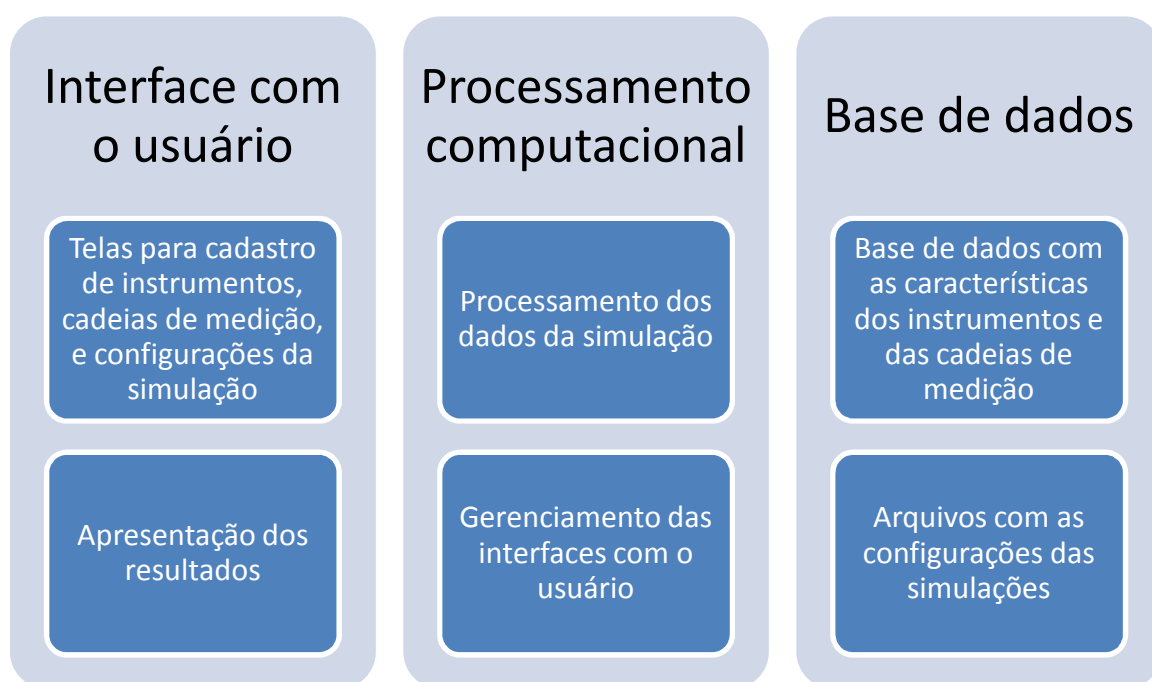


Figura 4.2 - Principais elementos do sistema

A interface com o usuário exige um alto grau de intuitividade e usabilidade, facilitando o aprendizado e uso do sistema, de forma a envolver o usuário e convidá-lo ao seu auto desenvolvimento.

Os elementos que necessitam de análise mais cuidadosa são os algoritmos de cálculo (processamento computacional), já que a solução proposta deve atender ao que se propõe, apresentando resultados com alto grau de confiabilidade.

A base de dados deve permitir o armazenamento de um grande número de informações a respeito dos instrumentos de medição, das cadeias montadas pelo usuário e também de dados de configuração das simulações.

O tópico seguinte apresenta uma breve análise da ferramenta de desenvolvimento a ser utilizada na implementação do sistema, o LabVIEW, frente aos requisitos de maior relevância definidos para o sistema.

4.2 LABVIEW

O software LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), produzido pela National Instruments, é uma ferramenta de desenvolvimento que permite a aquisição de dados, análise, simulação ou controle de instrumentos e processos. Também permite o controle via Internet de instrumentos e processos, além da criação de arquivos autoexecutáveis para serem utilizados em computadores que não possuem o software instalado (NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, 2003).

O LabVIEW usa uma linguagem de programação chamada G. Essa linguagem possui diretivas como PASCAL e C, mas que ao invés de utilizar comandos na forma de texto para gerar as linhas de código, usa uma linguagem de programação gráfica, ou seja, o programa é feito na forma de um diagrama de blocos (NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, 1999).

Utilizando uma estrutura de programação orientada pelo fluxo de dados e hierárquica, o LabVIEW torna simples a implementação de sistemas complexos que englobem aquisição e manipulação de dados ou ainda o controle de equipamentos através do computador. Ao contrário das linguagens de programação baseadas em texto, onde instruções determinam a execução do programa, LabVIEW usa programação por fluxo de dados, onde este determina a execução (TRAVIS, 2002).

Além disso, o LabVIEW inclui diversas bibliotecas compostas por componentes contendo funções para aplicações específicas (algoritmos de análise estatística, processamento e geração de sinais etc.) (NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, 1999).

4.2.1 Instrumentos Virtuais

Qualquer programa feito em LabVIEW é chamado de instrumento virtual (*VI-virtual instrument*) já que sua aparência e operação assemelham-se às de instrumentos reais. Um VI, assim como um programa usual, é composto por um conjunto de instruções que fazem a manipulação e fluxo dos dados, e por uma interface com o usuário, na qual se encontram as entradas e saídas necessárias. Basicamente, pode-se identificar em um VI duas partes que o compõem (NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, 2003):

- **diagrama de blocos:** é a estrutura do programa propriamente dita, que contém o código fonte construído de forma gráfica;
- **painel frontal:** constitui a interface com o usuário, apresentando de forma visual todos os controles, gráficos e indicadores, formando uma tela que simula o painel físico de um instrumento. Esse pode ser formado por botões, *LED*, potenciômetros e indicadores que permitem a interação através do *mouse* ou do teclado do computador.

4.2.2 Análise da Ferramenta de Desenvolvimento

Com os requisitos definidos, é possível estabelecer critérios para a seleção de ferramentas adequadas de desenvolvimento e, dessa forma, elucidar o inter-relacionamento entre os requisitos do sistema e as especificações desejadas para a ferramenta de desenvolvimento na implementação do mesmo, neste caso, o LabVIEW.

A tabela 4.1 apresenta os pontos fracos e fortes da ferramenta de desenvolvimento adotada frente aos requisitos de maior relevância definidos para o sistema.

Tabela 4.1 - Inter-relações entre requisitos do sistema e características desejáveis da ferramenta de desenvolvimento

Características Desejáveis	LabVIEW
Integração com a plataforma Windows	Sim
Disponibilidade de funções matemáticas avançadas	Sim
Suporte a manipulação e processamento de grande volume de dados	Sim
Capacidade para programação orientada a objetos	Não
Facilidade de aprendizado	Sim
Facilidade para o desenvolvimento de interfaces gráficas	Sim
Possibilidade de geração de programas executáveis	Sim
Criação, acesso e manipulação de uma base de dados	Sim

Definidos os requisitos do sistema e identificando que a ferramenta de desenvolvimento a ser utilizada possui características que permitem a sua implementação, apresenta-se a seguir o desenvolvimento da solução proposta.

4.3 O SISTEMA DESENVOLVIDO

Este tópico apresenta a solução proposta, discutindo sobre sua estrutura funcional e sobre o relacionamento entre os seus diversos módulos de entrada e visualização dos dados.

Durante o desenvolvimento da solução foram adotadas algumas subdivisões para os dados que devem ser informados pelo usuário, e que são apresentadas a seguir.

4.3.1 Subdivisões Adotadas

4.3.1.1 Categoria de Instrumentos

Com o elevado número de especificações com diferentes linguagens utilizadas para discriminar as várias fontes de incerteza de um instrumento de medição, surgiu a necessidade de estabelecer um conjunto de informações a serem consideradas na caracterização de um instrumento. A saída foi criar as categorias de instrumentos,

para que todos os instrumentos que pertencem a uma certa categoria, tenham um mesmo conjunto de informações acerca de suas características metrológicas. Se não fosse dessa forma, teria que ser criada uma interface que combinasse um grande número de perguntas para o usuário, fazendo com que o mesmo deixasse muitos campos em branco por não ter os dados necessários para o preenchimento das características. Isso gera uma padronização da linguagem utilizada e das informações que caracterizam metrologicamente os instrumentos de medição. Dessa forma define-se:

Categoria de Instrumentos: representa uma caracterização genérica de instrumento. Nesse modelo é especificado um conjunto mínimo de características (efeitos sistemáticos e aleatórios, ajustes, ganhos, entre outros) que um instrumento pertencente a uma dada categoria de instrumento deve apresentar.

4.3.1.2 Instrumentos de Medição

Tendo definido o conjunto de características metrológicas de cada categoria de instrumentos, pode-se cadastrar um novo instrumento de medição, alimentando a base de dados do sistema com informações quantitativas sobre as fontes de incerteza definidas para a sua respectiva categoria. Assim, define-se:

Instrumentos de Medição: modelo particularizado: corresponde a uma categoria de instrumento, com seu conjunto de características definidos para um determinado tipo de instrumento. Vem como uma particularização do modelo genérico, feita através da especificação de parâmetros de fabricação do equipamento em questão ou dados da calibração. É voltado para instrumentos caracterizados por um tipo em particular ou marca, como: termopar tipo J do fabricante A, voltímetro modelo XX do fabricante B, e assim por diante.

4.3.1.3 Cadeias de Medição

Na bancada de ensaio de compressores, distintos módulos estão interligados para atender necessidades específicas de medição. Com o objetivo de permitir reconfigurar os módulos, e até mesmo fazer substituições, é necessário definir o seguinte elemento:

Cadeias de medição: uma vez que se tem os instrumentos de medição cadastrados na base de dados, torna-se possível a montagem de cadeias de medição com esses instrumentos. Pode-se, então, substituir ou acrescentar novos instrumentos, permitindo, através de simulações, identificar e avaliar os pontos fracos da cadeia de medição.

4.3.2 Estrutura da Solução Proposta

O método de Monte Carlo utiliza o conceito de propagação de distribuições, que consiste, primeiramente, em assumir distribuições de probabilidade apropriadas (como retangular, normal, triangular, entre outras) para as fontes de incerteza de medição. Essas distribuições são, então, propagadas através da equação da medição. A estrutura do sistema proposto foi concebida de forma a trabalhar com esta abordagem de avaliação de incerteza. Portanto, o sistema está dividido em 5 blocos de funcionalidades para permitir:

- **a definição das distribuições de probabilidade para cada uma das fontes de incerteza de medição:** Cadastro da Categoria de Instrumentos e Cadastro de Instrumentos;
- **a construção de um modelo matemático para o resultado da medição (função de medição):** Cadastro da Cadeia de Medição;
- **definição de todas as cadeias de medição que compõem a bancada de ensaio:** Configuração da Bancada;
- **cálculo e apresentação dos resultados:** Cálculo da Incerteza.

O primeiro bloco consiste na parte de **Cadastro de Instrumentos**, onde são cadastrados os instrumentos de medição, juntamente com as informações das características metrológicas. A partir do bloco de cadastro de instrumentos é possível acessar outro bloco, de **Cadastro da Categoria de Instrumentos**. Nele devem-se criar categorias de acordo com as quais os instrumentos de medição serão classificados, informando qual é a configuração mínima (quais parâmetros metrológicos são obrigatoriamente requeridos) para cada categoria de instrumento de medição.

Também faz parte do sistema o bloco **Cadastro da Cadeia de Medição**. Nessa interface é feita a escolha de todas as categorias de instrumento que serão utilizadas em uma dada cadeia de medição, informando também a função de medição.

Além desses, há ainda o bloco no qual é feita a **Configuração da Bancada**, com a escolha dos instrumentos, dentre os previamente cadastrados, para uma dada categoria de instrumentos. Nesse momento é definida qual variável será medida (por exemplo: temperatura), qual a cadeia de medição que será utilizada (por exemplo: medição com Pt100 a 2 fios ou com Pt100 a 4 fios), e quais instrumentos compõem esta cadeia (por exemplo: o Pt100 do tipo A, do fabricante X).

Por último, tem-se o bloco **Cálculo da Incerteza**, responsável por todas as configurações, processamento e apresentação dos resultados dos cálculos de incerteza de medição pertinentes à bancada de ensaio criada pelo usuário.

4.3.2.1 Cadastro da Categoria de Instrumentos

Com o objetivo de garantir que todos os instrumentos que pertencem a uma mesma categoria apresentem um mesmo conjunto de informações acerca de suas características metrológicas, foi desenvolvida uma interface para fazer o cadastro das categorias de instrumentos, conforme apresentada na figura 4.3.

Símbolo	Descrição	Unidade

Figura 4.3 - Tela de cadastro das categorias de instrumento de medição

Quando criamos uma cadeia de medição, devemos informar o relacionamento entre os instrumentos utilizados através da função de medição. Na função de medição informamos quais são as características do instrumento que entram no cálculo da incerteza de medição. Ter características comuns aos instrumentos de medição pertencentes a uma mesma categoria permite fazer a escolha entre qualquer instrumento cadastrado para uma dada categoria, sem a necessidade de se alterar a função de medição.

A figura 4.4 é uma interface para a entrada do que se chama de configuração mínima que todo instrumento de uma dada categoria deve apresentar.

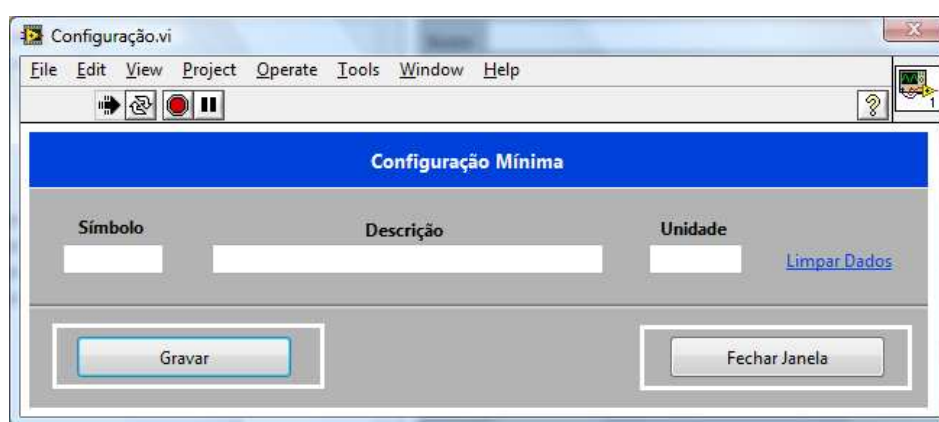


Figura 4.4 - Tela de entrada da configuração mínima das categorias de instrumento de medição

4.3.2.2 Cadastro de Instrumentos

Uma vez que as categorias de instrumentos estejam criadas, é necessário particularizar aquela caracterização genérica ou modelo. A partir de então torna-se necessário especificar os parâmetros de fabricação do instrumento em questão, com os dados retirados de catálogos (*datasheets*) fornecidos pelo fabricante.

A figura 4.5 apresenta a interface disponível para o usuário realizar a entrada das características metroológicas dos instrumentos em cadastro.

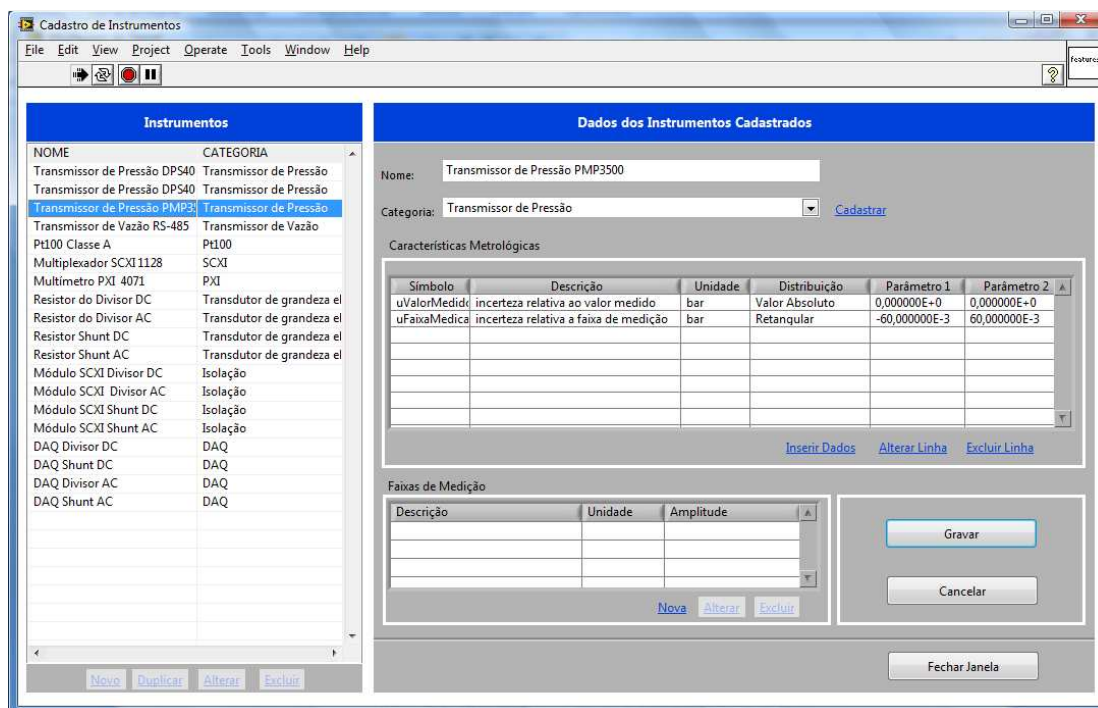


Figura 4.5 - Tela de cadastro dos instrumentos de medição

É possível realizar a entrada de um novo dado, ou a edição ou exclusão de um dado já inserido para determinado instrumento cadastrado. A figura 4.6 mostra a interface disponível para realizar essas operações.

É comum aparecer na avaliação de incerteza, parcelas que dependem da faixa de medição utilizada e do valor da variável medida. Temos o exemplo de um dos transmissores utilizados na medição de pressão na bancada de ensaios. Esse transmissor pode efetuar medições de até 10 bar, e a incerteza de medição é:

- de (0 a +5) bar: $0,1\% \cdot \text{Valor medido} + 0,1\% \cdot \text{Faixa de medição}$;
- de (+5 a +10) bar: $0,2\% \cdot \text{Valor medido} + 0,1\% \cdot \text{Faixa de medição}$.

Levando em consideração essa característica, o sistema permite o cadastro das faixas de medição do instrumento e, além disso, permite informar uma função que relaciona o valor de um determinado parâmetro com as variáveis de influência (ver figura 4.7).

4.3.2.3 Cadastro da Cadeia de Medição

O principal motivo para se ter uma base de dados com o cadastro de vários instrumentos de medição, com suas características metrológicas todas definidas e condensadas em um conjunto de informações, é a realização do cadastro de cadeias de medição para a avaliação da incerteza de medição do conjunto.

O cadastro da cadeia de medição é realizado a partir da interface mostrada na figura 4.8, na qual o usuário deverá listar ou escolher as categorias de instrumentos que serão utilizadas em uma determinada cadeia de medição.

Figura 4.8 - Tela de Cadastro da Cadeia de Medição

O motivo de se escolher a categoria do instrumento e não o instrumento para se montar a cadeia, é que dessa forma tem-se a flexibilidade de escolher um dentre os vários instrumentos cadastrados para uma categoria específica, e assim gerar muitas possibilidades de combinação de instrumentos, permitindo, dessa forma, avaliar qual deles é mais adequado para efetuar determinada medição.

É neste momento que o usuário informa também a função de medição, explicitando todas as parcelas de incerteza que compõem a incerteza final de uma medição empregando um determinado conjunto de instrumentos (cadeia de medição).

Diversas combinações de módulos podem ser empregadas em aplicações gerais. O ordenamento dos módulos, ao longo da cadeia de medição, obedece a uma seqüência lógica, porém não rígida, cuja configuração é influenciada por vários aspectos, finalidade dos dados e características dos módulos.

Nesse processo de cadastro de uma nova cadeia de medição é possível informar qual é o relacionamento entre os módulos, ou seja, determinar qual é a posição de cada instrumento na cadeia de medição, e assim poder definir que o sinal de saída de determinado módulo será a entrada para o próximo na cadeia.

4.3.2.4 Configuração da Bancada de Ensaio

Nesse processo, aqui chamado de configuração da bancada de ensaio, realiza-se uma particularização de todas as configurações feitas anteriormente. Passa-se de um modelo genérico - onde se tinha uma cadeia de medição definida somente com as categorias de instrumento utilizadas pela mesma - para um modelo mais particular, onde se escolhe um instrumento de medição, previamente cadastrado, de um determinado fabricante. Na figura 4.9 é apresentada a interface disponível para a configuração da bancada de ensaio.

Figura 4.9 - Tela para a Configuração da Bancada de ensaio

Com a escolha de um instrumento em particular, o sistema reúne as informações ou os valores das características metrológicas cadastradas para ele, para posteriormente efetuar o cálculo da incerteza de medição.

A interface apresentada na figura 4.9 possui uma barra de menu em sua parte superior, a partir da qual pode-se acessar as seguintes funcionalidades do sistema:

- **Abrir Projeto:** é possível abrir um projeto pré-existente, criado e salvo na base de dados do sistema. Isso permite que o usuário tenha acesso às suas simulações anteriores, resgatando todas as informações e, podendo, a partir daí, efetuar todas as alterações que desejar;
- **Novo Projeto:** quando o usuário seleciona a opção para criar um novo projeto, o sistema inicia todas as suas interfaces para a criação de uma nova simulação. Ao término de todas as configurações que o usuário desejar realizar, pode-se salvar o projeto para visualizações ou edições futuras, conforme apresentado no item acima;
- **Cadastrar Instrumento:** essa opção chama a interface que realiza o cadastro de um novo instrumento de medição na base de dados do sistema (figura 4.5);
- **Cadastrar Cadeia:** chama a interface para o cadastro de uma nova cadeia de medição na base de dados do sistema (figura 4.8);
- **Cálculo de Incerteza:** todas as rotinas e configurações para o cálculo de incerteza da bancada configurada pelo usuário são acessadas por esse item do menu.

4.3.2.5 Cálculo da Incerteza

Por fim, tem-se o módulo do sistema que contém todas as rotinas que efetuam a simulação. Nesse ponto, são definidos alguns parâmetros – número de simulações, probabilidade de abrangência e o número de intervalos no histograma – de configuração para a simulação.

Os resultados da simulação de Monte Carlo são apresentados nessa interface (figura 4.10), na forma de gráficos, apresentando as distribuições de probabilidade para cada variável medida na bancada montada, além das informações da média e dos limites inferior e superior da distribuição.

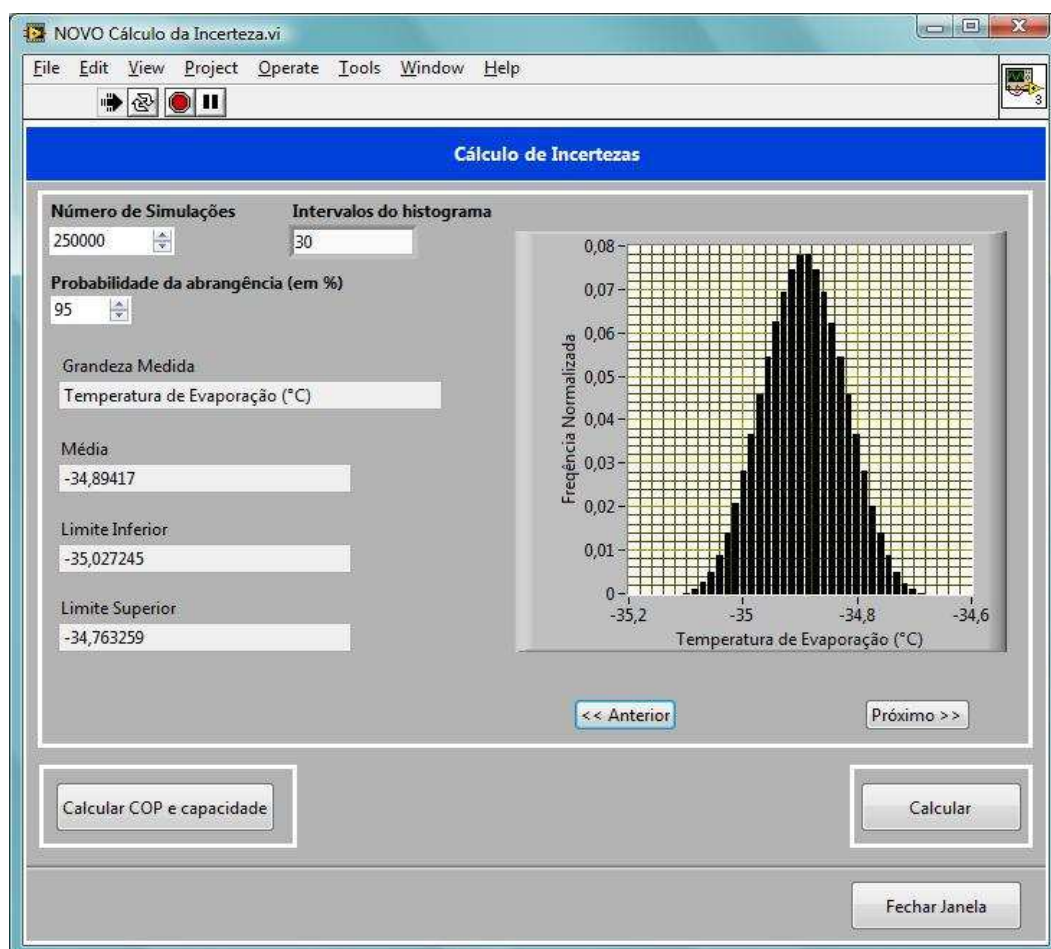


Figura 4.10 - Interface para o cálculo e apresentação dos resultados

Após o cálculo das distribuições de saída das grandezas medidas pela bancada, é possível utilizar as distribuições para efetuar o cálculo do COP, da capacidade de refrigeração e da potência ativa consumida. O sistema desenvolvido realiza a integração com um programa desenvolvido por Flesch (2006), que realiza uma simulação de Monte Carlo para a determinação dos valores de COP, capacidade, consumo e fluxo de massa, em condições de ensaio previamente configuradas.

Esta integração permitiu a geração de informações que possibilitaram avaliar o desempenho do sistema desenvolvido. Essa avaliação de desempenho é apresentada no próximo capítulo, onde é analisado um caso de aplicação do sistema.

5 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO A UMA BANCADA DE ENSAIOS

Poletto (2006) avaliou a incerteza de medição da primeira bancada utilizada pelo Labmetro, apenas para a seguinte condição de operação: (-23,3 e +54,4)°C, respectivamente temperatura de condensação e evaporação.

No trabalho realizado por Petrovcic (2007), a avaliação das incertezas de tal bancada foi estendida para outras duas condições de ensaio: (-35 e +65)°C e (-5 e +45)°C. Além disso, o referido autor fez um balanço de incertezas da nova bancada de ensaio de compressores, proposto em seu trabalho de mestrado, nessas três condições de operação, para efeito de comparação com os resultados obtidos para a bancada antiga.

Para cada cadeia de medição (temperatura, pressão, vazão mássica e grandezas elétricas), foi utilizado o método tradicional de avaliação de incertezas – ISO GUM (INMETRO, 2003). Petrovcic (2007) utilizou um conjunto de planilhas que dividiram sistematicamente os cálculos necessários para a avaliação da incerteza, além de vários arquivos que continham um roteiro para os cálculos das parcelas de incerteza.

Para obtenção da incerteza do coeficiente de performance (COP), capacidade de refrigeração e consumo de potência, foi utilizado o método numérico Monte Carlo, com 250 mil iterações, de acordo com o método C da norma ISO-917 (ISO, 1989). Os valores utilizados para avaliar a incerteza das medições foram retirados de catálogos fornecidos por fabricantes.

Diferentemente da avaliação de incertezas feita por Petrovcic (2007), pelo método do ISO GUM, o sistema desenvolvido neste trabalho de mestrado, realiza a análise de incertezas de cada cadeia de medição da bancada de ensaio de compressores pelo método de Monte Carlo, com 250 mil iterações e com uma probabilidade de abrangência de 95%.

No presente capítulo é apresentado um caso de aplicação do sistema desenvolvido, reproduzindo a avaliação de incertezas realizada por Petrovcic (2007) em seu trabalho de mestrado. Os valores de incerteza para o COP e capacidade de refrigeração encontrados em ambas as abordagens de avaliação, foram comparados de modo a avaliar o desempenho do sistema desenvolvido.

Foi simulada uma bancada de ensaio de desempenho de compressores, e determinadas as incertezas de medição das seguintes grandezas:

- temperatura de evaporação;
- temperatura de condensação;
- temperatura do ambiente do calorímetro;
- temperatura superficial do calorímetro;
- temperatura de sucção do compressor;
- temperatura de saída do calorímetro;
- temperatura de entrada do calorímetro;
- pressão de sucção do compressor;
- pressão de descarga do compressor;
- pressão na entrada do calorímetro;
- pressão na saída do calorímetro;
- potência entregue ao calorímetro;
- potência consumida pelo compressor;
- vazão mássica.

O valor de cada uma das grandezas listadas acima é determinado através de medições utilizando-se um ou mais instrumentos de medição. O sistema de simulação faz uma análise da incerteza de medição para cada variável, levando em conta todas as informações fornecidas pelo usuário quanto às características metrológicas dos instrumentos utilizados nas cadeias de medição.

Os tópicos a seguir apresentam, primeiramente, dois exemplos de aplicação do sistema desenvolvido, na determinação da incerteza de medição para duas grandezas: temperatura e pressão.

Em seguida são apresentados os resultados para o COP e capacidade de refrigeração para duas das três condições de operação, (-35 e +65) °C e (-23,3 e +54,4) °C, avaliadas por Petrovcic (2007).

Já que serão feitas comparações entre os dois métodos de avaliação de incertezas de medição da bancada de ensaio analisada, deste ponto em diante, os resultados da análise de incertezas realizada por Petrovcic (2007) serão chamados de “valores de referência”.

5.1.1 Cadeia de Medição de Temperatura

De acordo com as informações apresentadas no item 2.2.2, 17 medições de temperatura utilizam a cadeia de medição apresentada na figura 5.1.

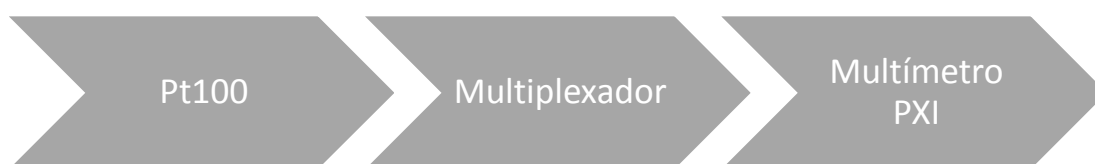


Figura 5.1 - Cadeia de medição de temperatura

As 17 medições são realizadas em distintos pontos do sistema de refrigeração ensaiado pela bancada, e a título de análise e validação do sistema desenvolvido, foram analisadas as incertezas de medição de temperatura somente em três em pontos:

- temperatura de evaporação;
- temperatura de condensação;
- temperatura de sucção do compressor.

5.1.1.1 Componentes de Incerteza do Pt100

Os transdutores utilizados são do tipo Pt100, classe A, de 4 fios. Esses transdutores possuem erro máximo admissível de 0,15 °C em 0 °C. Esse valor sofre acréscimo de 0,002 °C para cada grau Celsius da temperatura medida (SENSOR SCIENTIFIC, 2008). O erro máximo do Pt100 utilizado é dado pela equação 5.1 (ABNT, 1997):

$$U(Pt100) = 0,15 + 0,002 \cdot T_{medida} \quad (5.1)$$

onde:

$U(Pt100)$: é o erro máximo do Pt100 [°C];

T_{medida} : é a temperatura medida [°C].

A relação que determina a temperatura com base na resistência do transdutor Pt100 está mostrada na equação 5.2. As constantes A, B e C dependem do grau de platina utilizado e são definidos em várias normas como DIN43760 e ITS-90 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008), por exemplo. Os valores adotados aqui são os definidos pela norma NBR 13772 (ABNT, 1997). A constante C só deve ser utilizada para valores de temperatura menores que 0 °C. Para valores maiores que 0 °C, a constante C vale zero.

$$R = R_{0^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100) \cdot T^3) \quad (5.2)$$

onde:

R: é a resistência equivalente à temperatura do Pt100 [Ω];

$R_{0^{\circ}\text{C}}$: é a resistência do Pt100 a 0 °C [Ω];

A, B, C: $A=3,908 \cdot 10^{-3} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$, $B=-5,802 \cdot 10^{-7} [^{\circ}\text{C}^{-2}]$ e $C=-4,273 \cdot 10^{-12} [^{\circ}\text{C}^{-4}]$;

T: é a temperatura a que o Pt100 está submetido [$^{\circ}\text{C}$].

5.1.1.2 Componentes de Incerteza do Multiplexador

O multiplexador utilizado apresenta, para cada canal diferencial, uma tensão termoelétrica proveniente da união de materiais diferentes (efeito Seebeck), com valor menor que 25 μV para temperaturas de operação de (0 a 25) °C e valor menor que 100 μV para temperaturas de operação maiores que 25 °C. Para amenizar esse salto de 25 μV para 100 μV , assumiu-se que, a partir de 25 °C, a função seja uma reta que inicia em 25 μV e termina em 100 μV para a temperatura de 50 °C, que é a temperatura máxima de funcionamento deste módulo. Assim, para a temperatura de 30 °C (temperatura máxima em que a instrumentação deve se manter, segundo informações fornecidas pela empresa parceira deste trabalho), tem-se 40 μV . Esse efeito foi modelado como sendo uma fonte de tensão em série com a resistência do Pt100.

$$U(MUX) = 40 \mu\text{V} \quad (5.3)$$

onde:

U(MUX): é a incerteza referente ao módulo de multiplexação - tensão termoelétrica [V].

Por se tratar de medição a quatro fios, o efeito da resistência de contato foi considerado desprezível (CAMARANO; FLESCHE, 1992; CAMARANO, 1993).

5.1.1.3 Componentes de Incerteza do Multímetro PXI

O multímetro utilizado realizará medições de resistência a 4 fios. A faixa de medição a ser utilizada será a de 1 k Ω (corrente de 1 mA – $I_{\text{multímetro}}$), a qual possui uma parcela de incerteza relativa ao valor medido e outra relativa à faixa de medição. As especificações são garantidas pelo fabricante para intervalo de calibração e regulação de 2 anos. Um erro adicional de ruído também é levado em consideração relativo à faixa de medição.

$$U(\text{valor medido}) = 55 \cdot 10^{-6} \cdot R_{\text{medida}} \quad (5.4)$$

$$U(\text{faixa de medição}) = 1 \cdot 10^{-6} \cdot FM \quad (5.5)$$

$$U(\text{ruído}) = 10^{-5} \cdot FM \quad (5.6)$$

onde:

$U(\text{valor medido})$: incerteza referente ao valor medido [Ω];

$U(\text{faixa de medição})$: incerteza referente à faixa de medição utilizada [Ω];

$U(\text{ruído})$: incerteza devida ao ruído térmico [Ω];

R_{medida} : é a resistência medida [Ω];

FM : é a faixa de medição [V].

5.1.1.4 Função de medição da cadeia de temperatura

Após o levantamento das fontes de incerteza de todos os módulos componentes da cadeia de medição, define-se qual é a sua função de medição, de acordo com a equação 5.7.

$$T = \left[\left(\frac{U(MUX)}{I_{multimetro}} + R_{medidaPXI} + R_{0^{\circ}C} \cdot A \cdot U(Pt100) + U(PXI) \right) - 1 \right] \cdot \frac{1}{A} \quad (5.7)$$

$$U(PXI) = U(valor\ medido) + U(faixa\ de\ medição) + U(ruído) \quad (5.8)$$

onde:

T: é o valor da temperatura de saída [°C];

U(MUX) [V]: é a incerteza referente ao módulo de multiplexação – tensão termoeletrica. Esta parcela de incerteza é expressa em volts, e foi dividida pela corrente do multímetro $I_{multimetro}$ para encontrar o valor de resistência em série com Pt100, uma vez que foi modelada como uma fonte de tensão em série com o Pt100;

$R_{medidaPXI}$ [Ω]: é o valor de resistência medida pelo multímetro PXI;

$R_{0^{\circ}C}$ [Ω]: é a resistência do Pt100 a 0 °C;

A: é a constante da equação do Pt100 (equação 5.2) que vale $3,908 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;

U(Pt100): erro máximo do Pt100 [°C];

5.1.1.5 Resultados das simulações para as temperaturas medidas

Depois de cadastrados todos os instrumentos da cadeia de medição de temperatura, e definida sua função de medição no banco de dados do sistema, foi possível realizar a simulação. Obteve-se como resultados, as distribuições de probabilidade para cada uma das variáveis medidas, além das informações sobre a média da distribuição, e dos limites inferior e superior da incerteza de medição, considerando uma probabilidade de abrangência de 95%.

A figura 5.2 apresenta o histograma com a distribuição de probabilidade da temperatura de evaporação.

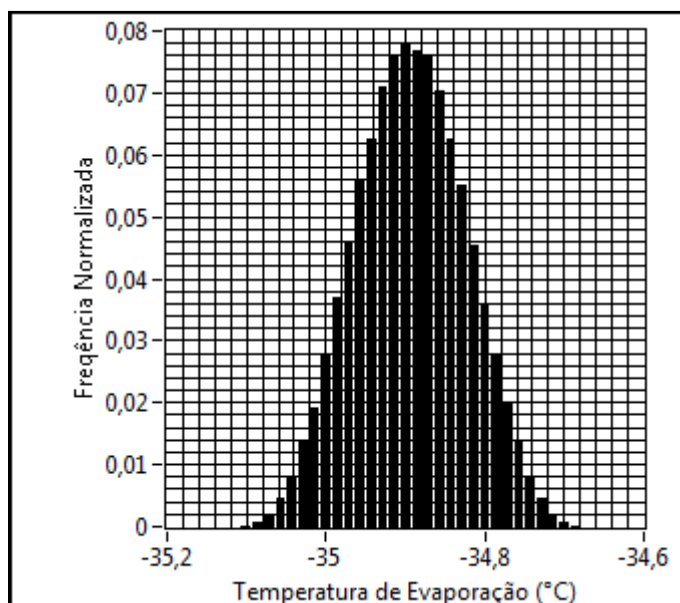


Figura 5.2 - Histograma da temperatura de evaporação

A tabela 5.1 compara os resultados obtidos para a média e para os limites de incerteza, confrontando-os com os valores de referência, obtidos a partir da análise feita pelo método do ISO GUM (INMETRO, 2003).

Tabela 5.1 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a temperatura de evaporação

Temperatura de evaporação [°C]			
valor medido: -35 °C			
Sistema de simulação		valores de referência	
valor médio [°C]	-34,89	Distribuição	normal
limite inferior [°C]	-35,03	valor médio [°C]	-35
limite superior [°C]	-34,76		
incerteza absoluta [°C]	0,14		0,25
incerteza relativa [%]	0,40		0,71

Nota-se uma diferença entre os valores das incertezas absoluta e relativa para ambos os casos. O fato justifica-se porque o uso da simulação de Monte Carlo melhora a qualidade do resultado para a incerteza, porque não está sujeita a

algumas limitações e aproximações de aplicabilidade do método do ISO GUM, as quais, frequentemente, implicam em resultados mais conservadores (a incerteza fica maior, compensando as limitações do método da “propagação de incertezas”).

A figura 5.3, a seguir, ilustra a distribuição de probabilidade da temperatura de condensação.

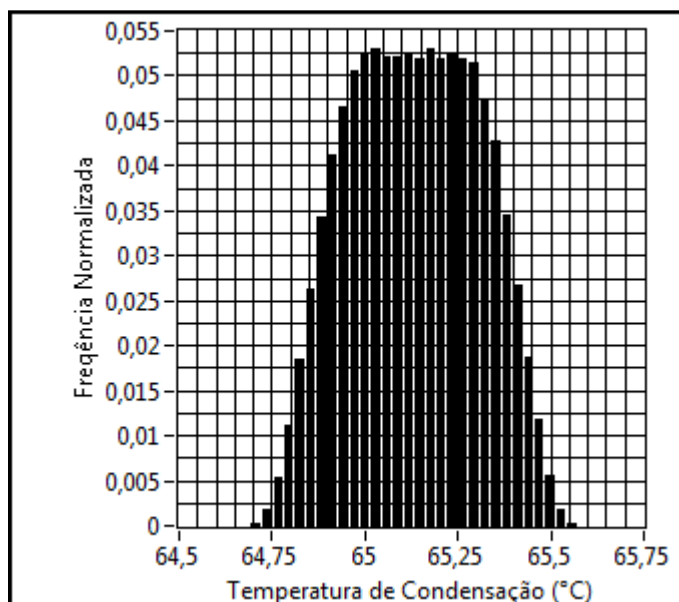


Figura 5.3 - Histograma da temperatura de condensação

A tabela 5.2 compara os valores das duas avaliações de incerteza realizadas, agora para a temperatura de condensação.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a temperatura de condensação

Temperatura de condensação [°C]			
valor medido: 65 °C			
Sistema de simulação		valores de referência	
valor médio [°C]	65,13	Distribuição	normal
limite inferior [°C]	64,82	valor médio [°C]	65
limite superior [°C]	65,44		
incerteza absoluta [°C]	0,31		0,32
incerteza relativa [%]	0,48		0,49

A próxima grandeza analisada foi a temperatura de sucção. A figura 5.4 apresenta sua distribuição de probabilidade e a tabela 5.3 a comparação dos resultados.

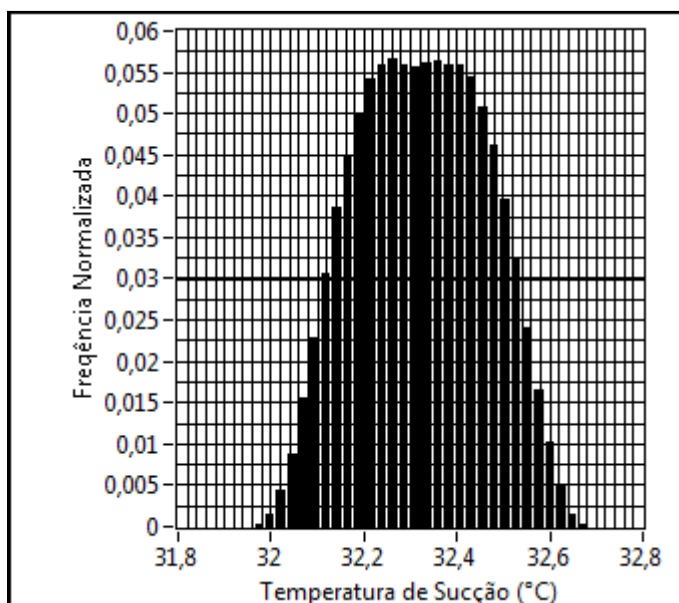


Figura 5.4 - Histograma da temperatura de sucção

Tabela 5.3 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a temperatura de sucção

Temperatura de sucção [°C]			
valor medido: 32,2 °C			
Sistema de simulação		valores de referência	
valor médio [°C]	32,32	Distribuição	normal
limite inferior [°C]	32,07	valor médio [°C]	32,20
limite superior [°C]	32,57		
incerteza absoluta [°C]	0,25		0,25
incerteza relativa [%]	0,77		0,77

Observando-se os resultados apresentados nas tabelas 5.2 e 5.3, nota-se que os resultados obtidos com o método proposto pelo ISO GUM estão bem próximos aos obtidos através da simulação de Monte Carlo. As considerações feitas no cálculo pelo ISO GUM, em que a distribuição de saída é representada por uma normal, espelhou bem a realidade para estes casos.

5.1.2 Cadeias de Medição de Pressão

As medições de pressão que foram analisadas são as correspondentes aos pontos:

- sucção do compressor;
- descarga do compressor;
- entrada do calorímetro;
- saída do calorímetro.

A bancada de ensaio utiliza dois tipos de transmissores para as medições de pressão: um com interface de comunicação CAN e outro com RS-485.



Figura 5.5- Cadeia de medição de pressão utilizando transmissor CAN



Figura 5.6- Cadeia de medição de pressão utilizando transmissor RS-485

Sendo assim, são apresentados em seguida os resultados do segundo exemplo de aplicação do sistema, para ambas as cadeias de medição acima apresentadas.

5.1.2.1 Componentes de incerteza do transmissor de pressão CAN

O erro máximo desses transmissores é dado pela equação 5.9 para valores de (0 a 50) % da faixa de medição. Para valores de (50 a 100) % da faixa de medição, deve-se utilizar a equação 5.10.

$$U(CAN) = 0,1\%.P_{medida} + 0,1\%.FM \quad (5.9)$$

$$U(CAN) = 0,2\%.P_{medida} + 0,1\%.FM \quad (5.10)$$

onde:

$U(CAN)$: é o erro máximo da medição de pressão com transdutor CAN [bar];

P_{medida} : é a pressão medida [bar];

FM : é a faixa de medição [bar].

5.1.2.2 Componentes de incerteza do transmissor de pressão RS-485

O erro máximo desse transmissor de pressão é dado pela equação 5.11. É utilizada apenas uma faixa de medição de (0 a 10) bar para a descarga do compressor.

$$U(RS485) = 0,3\%.FM \quad (5.11)$$

onde:

$U(RS485)$: erro máximo da medição de pressão com transmissor RS-485 [bar];

FM : é a faixa de medição [bar].

5.1.2.3 Função de medição para as cadeias de medição de pressão

As incertezas para os transmissores de pressão foram definidas pelas equações 5.9, 5.10 e 5.11.

$$P = P_{medida} \pm U(transmissor) \quad (5.12)$$

onde:

P_{medida} : pressão medida [bar];

$U(transmissor)$: é a incerteza referente ao transmissor utilizado [bar].

5.1.2.4 Resultados das simulações para as medições de pressão

Aqui são apresentados os histogramas e as tabelas com os resultados da simulação para as quatro pressões, sendo que para medição da pressão de descarga foi utilizado o transmissor de pressão com interface RS-485, e para as outras três o transmissor CAN.

A figura 5.7 apresenta o histograma com a distribuição de probabilidade da pressão de sucção.

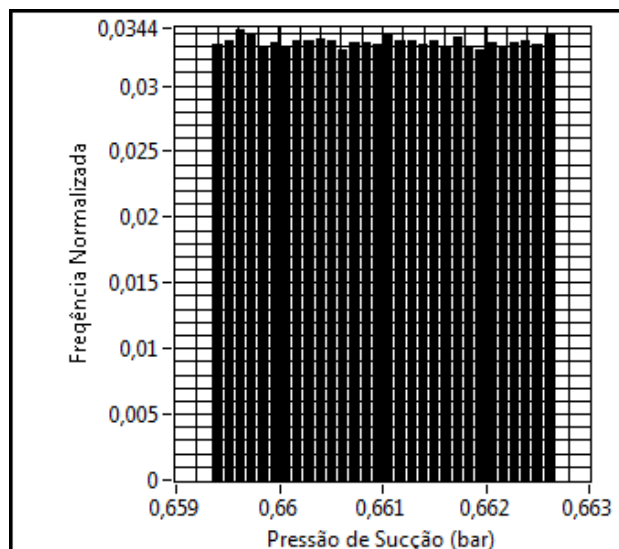


Figura 5.7 - Histograma da pressão de sucção do compressor

A tabela 5.4 compara os resultados obtidos para a média e para os limites de incerteza, confrontando-os com os valores de referência, obtidos a partir da análise feita pelo método do ISO GUM (INMETRO, 2003).

Tabela 5.4 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a pressão de sucção

Pressão de sucção [bar]		
valor medido: 0,661 bar		
Sistema de simulação	valores de referência	
	distribuição	retangular
valor médio [bar]	0,661	0,661
limite inferior [bar]	0,659	0,659
limite superior [bar]	0,663	0,663
incerteza absoluta [bar]	0,002	0,002
incerteza relativa [%]	0,303	0,303

Na figura 5.8, tem-se o histograma para a pressão de sucção.

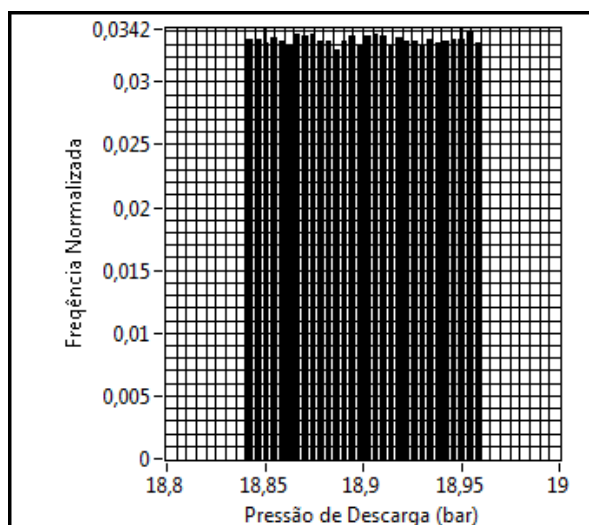


Figura 5.8 - Histograma para a pressão de descarga

Na tabela 5.5, pode-se observar os resultados obtidos pelo sistema, para pressão de descarga, frente aos valores tomados como de referência de comparação.

Tabela 5.5 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a pressão de descarga

Pressão de descarga [bar]			
valor medido: 18,9 bar			
Sistema de simulação		valores de referência	
		distribuição	retangular
valor médio [bar]	18,900		18,900
limite inferior [bar]	18,842		18,840
limite superior [bar]	18,956		18,960
incerteza absoluta [bar]	0,057		0,060
incerteza relativa [%]	0,301		0,317

A figura 5.9 apresenta o histograma para a pressão na entrada do calorímetro, seguida da tabela 5.6 com os resultados de média e limites de incerteza.

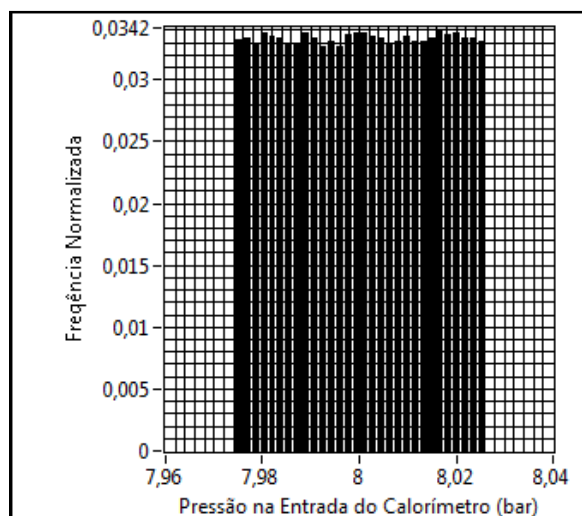


Figura 5.9 - Histograma para a pressão na entrada do calorímetro

Tabela 5.6 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a pressão na entrada do calorímetro

Pressão na entrada do calorímetro [bar]			
valor medido: 8 bar			
Sistema de simulação		valores de referência	
		distribuição	retangular
valor médio [bar]	8		8
limite inferior [bar]	7,977		7,974
limite superior [bar]	8,026		8,026
incerteza absoluta [bar]	0,025		0,026
incerteza relativa [%]	0,313		0,325

A última grandeza apresentada nesta seção é a pressão na saída do calorímetro; ver figura 5.10 e tabela 5.7.

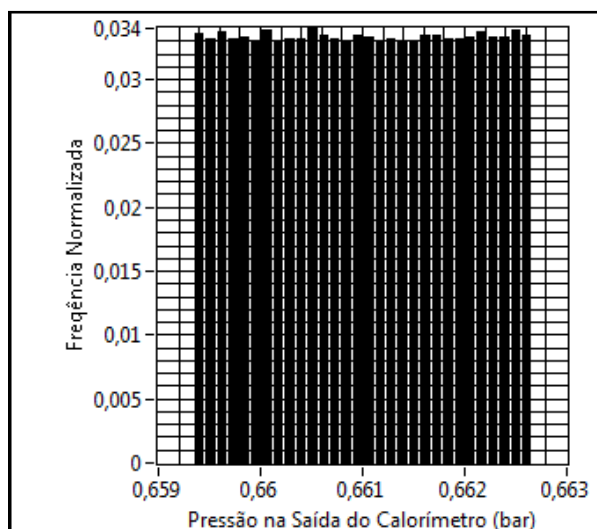


Figura 5.10 - Histograma para a pressão na saída do calorímetro

Tabela 5.7 - Resultados obtidos com o sistema e os valores de referência para a pressão na saída do calorímetro

Pressão na saída do calorímetro [bar]			
valor medido: 0,661 bar			
Sistema de simulação		valores de referência	
		distribuição	retangular
valor médio [bar]	0,661		0,661
limite inferior [bar]	0,659		0,659
limite superior [bar]	0,663		0,663
incerteza absoluta [bar]	0,002		0,002
incerteza relativa [%]	0,303		0,303

A análise através da simulação de Monte Carlo resultou em valores menores para as incertezas absoluta e relativa, o que demonstra espelhar melhor a realidade das medições em comparação aos resultados pelo ISO GUM. Houve um aumento na qualidade do resultado para a incerteza, porque não está sujeita a algumas limitações e aproximações de aplicabilidade do método do ISO GUM, as quais, frequentemente, implicam em resultados mais conservadores (a incerteza fica maior, compensando as limitações do método da “propagação de incertezas”).

5.1.3 Resultados para o COP e capacidade de refrigeração

Nas seções anteriores, foram apresentadas as incertezas de medição para temperatura e pressão. Além das incertezas de medição dessas grandezas, foram avaliadas as incertezas de outras variáveis relevantes para a determinação do COP e capacidade, todas listadas na tabela 5.8.

A tabela 5.8 apresenta os resultados da avaliação de incertezas realizada com o sistema desenvolvido.

Tabela 5.8 - Valores gerados pelo sistema desenvolvido e que foram utilizados na determinação dos valores do COP e da capacidade de refrigeração para a condição (-23,3 e +54,4) °C

Sistema desenvolvido - Condição (-23,3 +54,4) °C						
Análise do COP e capacidade						
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Unidade
Pressão de descarga	14,700	14,640	14,754	0,057	0,387%	bar
Potência real do compressor	141,001	140,693	141,312	0,310	0,220%	W
Fluxo de massa	1,341	1,340	1,343	0,001	0,095%	g/s
Pressão de entrada do calorímetro	8,000	7,976	8,025	0,025	0,309%	bar
Temperatura ambiente do calorímetro	4,566	4,368	4,767	0,200	4,371%	°C
Temperatura superficial do calorímetro	4,566	4,366	4,765	0,199	4,368%	°C
Pressão de saída do calorímetro	1,148	1,144	1,152	0,004	0,343%	bar
Temperatura de sucção	32,323	32,075	32,574	0,250	0,772%	°C
Temperatura de saída do calorímetro	32,323	32,072	32,572	0,250	0,773%	°C
Temperatura de entrada do calorímetro	25,120	24,883	25,358	0,237	0,944%	°C
Potência cc no calorímetro	248,996	248,419	249,561	0,571	0,229%	W
Pressão de sucção	1,148	1,144	1,152	0,004	0,343%	bar

A tabela 5.9, apresenta os valores gerados por Petrovcic (2007) em sua avaliação de incertezas, pelo método proposto no ISO GUM (INMETRO, 2003).

Tabela 5.9 - Valores de referência utilizados na determinação dos valores do COP e capacidade de refrigeração na condição (-23,3 e +54,4) °C

Valores de referência - Condição (-23,3 +54,4) °C						
Análise do COP e capacidade						
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Unidade
Pressão de descarga	14,700	14,640	14,760	0,060	0,408%	bar
Potência real do compressor	141,000	140,707	141,293	0,293	0,208%	W
Fluxo de massa	1,341	1,340	1,343	0,001	0,100%	g/s
Pressão de entrada do calorímetro	8,000	7,974	8,026	0,026	0,329%	bar
Temperatura ambiente do calorímetro	4,450	4,264	4,636	0,186	4,183%	°C
Temperatura superficial do calorímetro	4,450	4,264	4,636	0,186	4,183%	°C
Pressão de saída do calorímetro	1,148	1,142	1,154	0,006	0,500%	bar
Temperatura de sucção	32,200	31,952	32,448	0,248	0,770%	°C
Temperatura de saída do calorímetro	32,200	31,952	32,448	0,248	0,770%	°C
Temperatura de entrada do calorímetro	25,000	24,768	25,232	0,232	0,927%	°C
Potência cc no calorímetro	249,000	248,489	249,511	0,511	0,205%	W
Pressão de sucção	1,148	1,142	1,154	0,006	0,500%	bar

Todos os resultados de incerteza apresentados foram determinados com uma probabilidade de abrangência de 95%.

Observando as tabelas 5.8 e 5.9, pode-se constatar que o sistema desenvolvido apresenta bons resultados para a avaliação de incerteza, coerentes com aqueles apresentados pela avaliação pelo ISO GUM.

Com as distribuições de saída de cada grandeza, foi possível obter informações para a determinação dos valores do COP e capacidade de refrigeração, bem como os seus limites de incerteza.

Na tabela 5.10 estão os resultados obtidos para o COP e capacidade de refrigeração na condição de operação: (-23,3 e +54,4) °C, respectivamente temperatura de condensação e evaporação.

Tabela 5.10 - Resultados para o COP e capacidade de refrigeração considerando os valores de referência e os valores obtidos com o sistema proposto na condição (-23,3 e +54,4) °C

Condição (-23,3 +54,4) °C	Critério	CAP CAL (W)	CAP FM (W)	COP CAL	COP FM
Resultados para os valores de referência	Média	193,191	193,191	1,370	1,370
	lim inf	192,224	192,400	1,363	1,364
	lim sup	194,244	194,064	1,378	1,377
	inc med	1,010	0,832	0,008	0,007
	inc perc	0,52%	0,43%	0,57%	0,49%
Resultados para os dados gerados com o sistema desenvolvido	Média	193,251	203,893	1,371	1,446
	lim inf	192,366	203,210	1,364	1,440
	lim sup	194,363	204,836	1,379	1,454
	inc med	0,998	0,813	0,008	0,007
	inc perc	0,52%	0,40%	0,57%	0,47%

onde:

CAP CAL: é a capacidade de refrigeração encontrada empregando método do calorímetro;

CAP FM: é a capacidade de refrigeração pelo método do fluxo de massa;

COP CAL: é o COP determinado pelo método do calorímetro;

COP FM: é o COP pelo método do fluxo de massa.

Note que os resultados das colunas 4 e 6 da tabela 5.10 são diferentes. A diferença ocorre porque a aproximação linear da equação de medição usada no ISO GUM pode ser adequada quando as variáveis de entrada não-lineares tem pequenas incertezas; mas, os resultados a partir do ISO GUM são pobres aproximações quando as variáveis de entrada não-lineares tem altas incertezas, apresentando resultados subestimados (KACKER, 2006).

A seguir, nas figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 são apresentados os histogramas com os resultados obtidos para o COP e capacidade de refrigeração, na condição de operação considerada: (-23,3 e +54,4) °C.

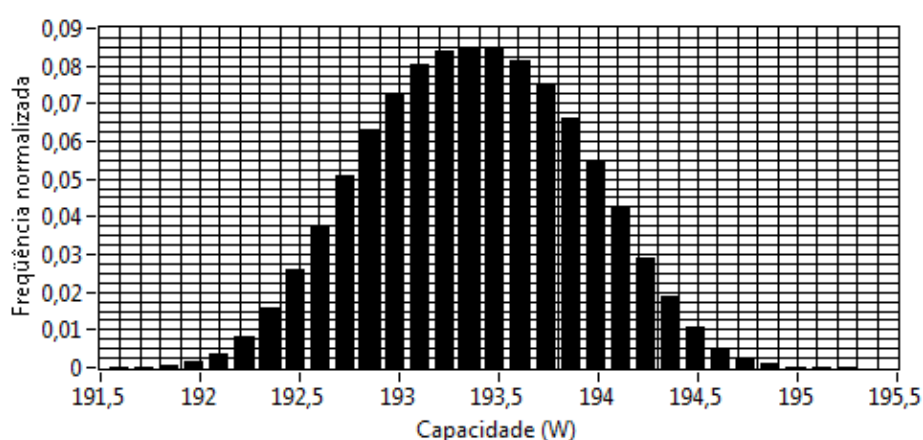


Figura 5.11 - Histograma da capacidade de refrigeração através do método do calorímetro, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-23,3 e +54,4) °C

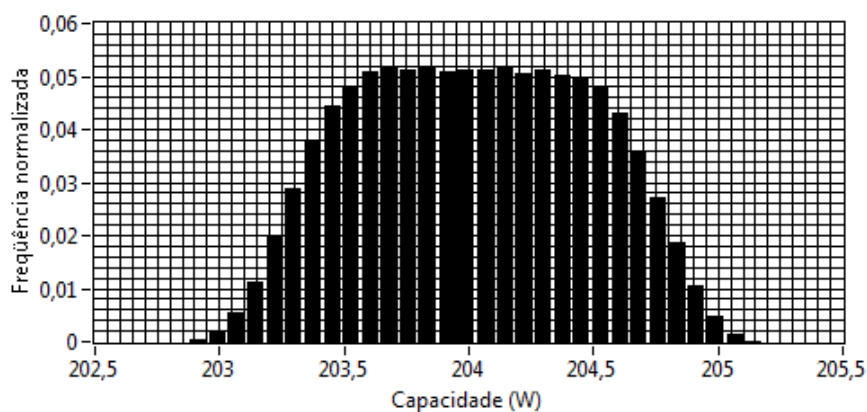


Figura 5.12 - Histograma da capacidade de refrigeração através do método do fluxo de massa, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-23,3 e +54,4) °C

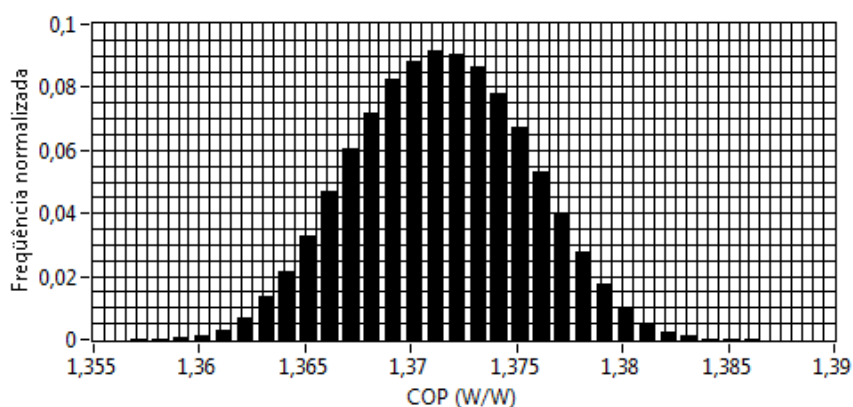


Figura 5.13 - Histograma do COP através do método do calorímetro, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-23,3 e +54,4) °C

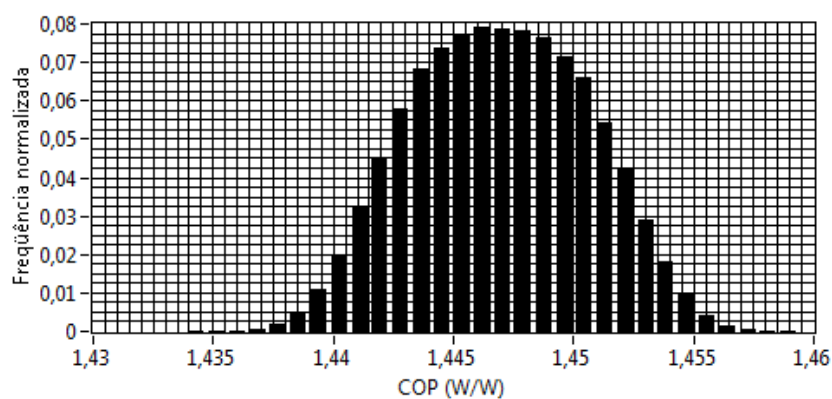


Figura 5.14 - Histograma do COP através do método do fluxo de massa, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-23,3 e +54,4) °C

Em seguida, são apresentados os resultados para a condição de operação (-35 e +65) °C. A tabela 5.11 apresenta os resultados da avaliação de incertezas realizada com o sistema desenvolvido, e a tabela 5.12 apresenta os valores gerados por Petrovic (2007) em sua avaliação de incertezas, pelo método proposto no ISO GUM (INMETRO, 2003).

Tabela 5.11 - Valores gerados pelo sistema desenvolvido e que foram utilizados na determinação dos valores do COP e capacidade de refrigeração para a condição (-35 e +65) °C

Sistema desenvolvido - Condição (-35 +65) °C						
Análise do COP e capacidade						
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Unidade
Pressão de sucção	0,661	0,659	0,663	0,002	0,239%	bar
Potência cc no calorímetro	77,000	76,789	77,210	0,211	0,273%	W
Temperatura de entrada do calorímetro	25,121	24,883	25,356	0,237	0,942%	°C
Temperatura de saída do calorímetro	32,323	32,070	32,570	0,250	0,774%	°C
Temperatura de sucção	32,323	32,071	32,572	0,250	0,775%	°C
Pressão de saída do calorímetro	0,661	0,659	0,663	0,002	0,239%	bar
Pressão de descarga	18,900	18,842	18,956	0,057	0,301%	bar
Potência real do compressor	84,000	83,769	84,225	0,228	0,271%	W
Fluxo de massa	0,413	0,413	0,414	0,000	0,095%	g/s
Pressão de entrada do calorímetro	8,000	7,977	8,026	0,025	0,309%	bar
Temperatura ambiente do calorímetro	-1,285	-1,476	-1,098	0,189	-14,705%	°C
Temperatura superficial do calorímetro	-1,286	-1,474	-1,095	0,189	-14,711%	°C

Tabela 5.12 - Valores de referência utilizados na determinação dos valores do COP e da capacidade de refrigeração na condição (-35 e +65) °C

Valores de referência - Condição (-35 +65) °C						
Análise do COP e capacidade						
Critério	Val. Med.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Inc. Abs.	Inc. Rel.	Unidade
Pressão de sucção	0,661	0,659	0,663	0,002	0,356%	bar
Potência cc no calorímetro	77,100	76,925	77,275	0,175	0,227%	W
Temperatura de entrada do calorímetro	25,000	24,768	25,232	0,232	0,927%	°C
Temperatura de saída do calorímetro	32,200	31,952	32,448	0,248	0,770%	°C
Temperatura de sucção	32,200	31,952	32,448	0,248	0,770%	°C
Pressão de saída do calorímetro	0,661	0,659	0,663	0,002	0,356%	bar
Pressão de descarga	18,900	18,840	18,960	0,060	0,317%	bar
Potência real do compressor	84,200	83,999	84,401	0,201	0,239%	W
Fluxo de massa	0,413	0,413	0,414	0,000	0,100%	g/s
Pressão de entrada do calorímetro	8,000	7,974	8,026	0,026	0,329%	bar
Temperatura ambiente do calorímetro	-1,400	-1,579	-1,221	0,179	12,812%	°C
Temperatura superficial do calorímetro	-1,400	-1,579	-1,221	0,179	12,812%	°C

Observando as tabelas 5.11 e 5.12, pode-se constatar que o sistema desenvolvido também apresenta bons resultados para a avaliação de incertezas na

nova condição de operação analisada, coerentes com aqueles apresentados pela avaliação pelo ISO GUM (INMETRO, 2003).

Na tabela 5.13 estão os resultados obtidos para o COP e capacidade de refrigeração na condição de operação (-35 e +65) °C .

Tabela 5.13 - Resultados para o COP e capacidade de refrigeração considerando os valores de referência e os valores obtidos com o sistema proposto na condição (-35 e +65) °C

Condição (-35 +65) °C	Critério	CAP CAL (W)	CAP FM (W)	COP CAL	COP FM
Resultados para os valores de referência	Média	53,147	53,147	0,631	0,631
	lim inf	52,893	52,952	0,628	0,628
	lim sup	53,419	53,364	0,635	0,634
	inc med	0,263	0,206	0,004	0,003
	inc perc	0,49%	0,39%	0,55%	0,47%
Resultados para os dados gerados com o sistema desenvolvido	Média	53,096	56,074	0,632	0,668
	lim inf	52,887	55,938	0,629	0,665
	lim sup	53,372	56,274	0,636	0,671
	inc med	0,243	0,168	0,003	0,003
	inc perc	0,46%	0,30%	0,53%	0,41%

onde:

CAP CAL: é a capacidade de refrigeração encontrada empregando método do calorímetro;

CAP FM: é a capacidade de refrigeração pelo método do fluxo de massa;

COP CAL: é o COP determinado pelo método do calorímetro;

COP FM: é o COP pelo método do fluxo de massa.

Note que os resultados das colunas 4 e 6 da tabela 5.13 também são diferentes, assim como observado na tabela 5.10. Aqui cabe a mesma justificativa feita para aquele caso.

A seguir, nas figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 são apresentados os histogramas com os resultados obtidos para o COP e capacidade de refrigeração, na condição de operação considerada: (-35 e +65) °C.

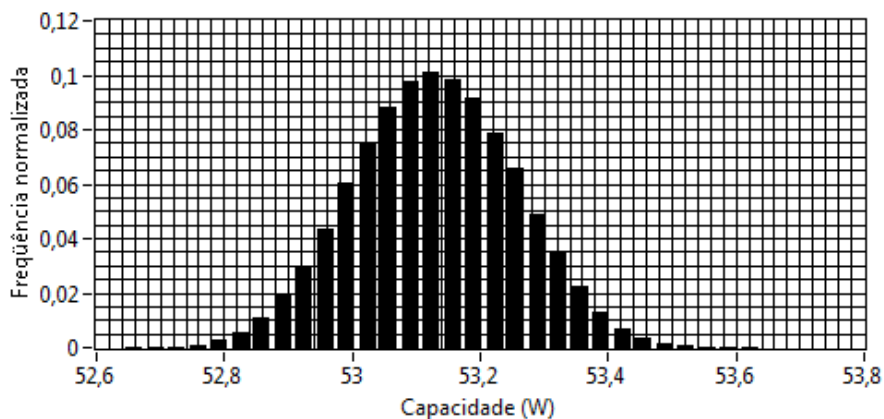


Figura 5.15 - Histograma da capacidade de refrigeração através do método do calorímetro, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-35 e +65) °C

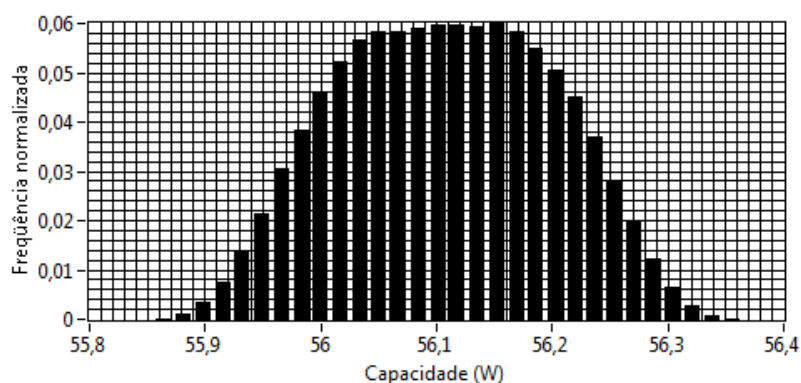


Figura 5.16 - Histograma da capacidade de refrigeração através do método do fluxo de massa, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-35 e +65) °C

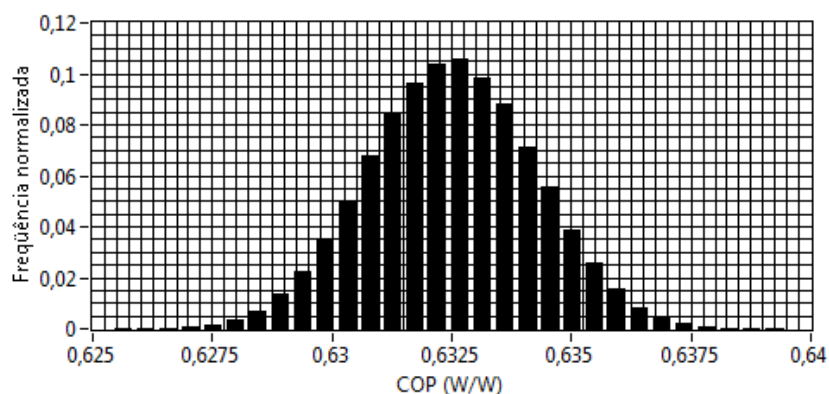


Figura 5.17 - Histograma do COP através do método do calorímetro, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-35 e +65) °C

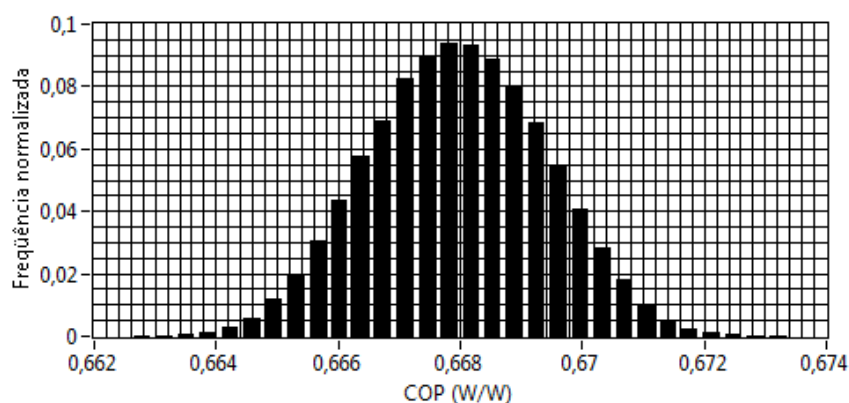


Figura 5.18 - Histograma do COP através do método do fluxo de massa, gerado a partir dos dados obtidos com o sistema proposto para a condição (-35 e +65) °C

5.2 ANÁLISE DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema computacional para a avaliação da incerteza de medição em painéis de ensaios de desempenho de compressores.

Teve início com o levantamento dos requisitos para o desenvolvimento do sistema para a avaliação da incerteza de medição.

Não foi necessário fazer um estudo para decidir qual a linguagem de programação a ser utilizada no desenvolvimento do sistema. Um dos requisitos

estabelecidos foi o uso da ferramenta de desenvolvimento LabVIEW, para permitir a integração com sistemas de automação de ensaios desenvolvidos em trabalhos anteriores.

Foram identificados três elementos que mereceram maior destaque no desenvolvimento do sistema: interface com o usuário, processamento computacional e base de dados. O software LabVIEW possui muitas ferramentas que possibilitam o desenvolvimento de sistemas de simulação do porte do que foi desenvolvido neste trabalho, atendendo aos requisitos desejáveis de software.

O sistema desenvolvido utiliza a abordagem de avaliação da incerteza pela simulação de Monte Carlo. Com base nisso, toda a estrutura do sistema foi implementada para permitir a aplicação dessa abordagem. A implementação do método de simulação de Monte Carlo traz a necessidade de se gerar distribuições de probabilidades para cada uma das fontes de incerteza de entrada. Exige-se que essas distribuições possuam um número significativo de amostras, de modo a melhorar a qualidade dos resultados das simulações. O LabVIEW não apresentou limitações quanto ao processamento matemático envolvido nos cálculos, desempenhando eficazmente a manipulação e processamento para um grande volume de dados.

A base de dados constitui parte essencial do sistema. Nele são armazenados todos os parâmetros necessários para o cálculo de incertezas e apresentação dos resultados. Por se tratar de um padrão já estabelecido, e também pela existência de blocos de funções predefinidos no LabVIEW, que permitem o armazenamento e manipulação de dados no formato XML (W3C, 2008), a implementação da base de dados foi feita utilizando-se esse padrão.

Antes de realizar as simulações e poder gerar dados para uma validação do sistema foi necessário alimentar sua base de dados e, dessa forma, avaliar também o funcionamento de todos os módulos do sistema, começando pelo cadastro das categorias de instrumentos, passando pelo cadastro de instrumentos e cadeias de medição, até chegar ao procedimento de configuração da bancada de ensaio.

Na estrutura definida para o sistema, o cadastro de instrumentos de medição permite a definição dos parâmetros inerentes e significativos para os instrumentos de medição, tais como resolução de um indicador, erro declarado de um certificado de calibração, influência de erro associada com a variação de temperatura.

Já a definição da cadeia e a sua respectiva função de medição permitem ao sistema, no momento da execução do cálculo da incerteza, explorar a base de dados dos instrumentos de medição envolvidos na medição, trazendo para o resultado todas as grandezas de influência, para a composição da incerteza expandida.

Nesse ponto, além do funcionamento dos módulos, pôde ser avaliado também o requisito de intuitividade e facilidade quanto ao uso do sistema. Como esses aspectos são geralmente subjetivos, são mais facilmente avaliados através de experimentação com diferentes usuários, o que não pôde ser realizado pelo pouco tempo que se dispunha para tal.

A validação do sistema consistiu em verificar se as técnicas e metodologias declaradas como conformes na etapa de implementação estavam sendo executadas a rigor. Foi realizada uma comparação de resultados com os da abordagem de avaliação de incertezas proposto pelo ISO GUM (INMETRO, 2003). O trabalho desenvolvido por Petrovcic (2006) apresenta uma avaliação da incerteza de medição de uma bancada de ensaio de desempenho de compressores, e um conjunto de resultados que serviram como referência para a validação do sistema desenvolvido no presente trabalho.

Os resultados obtidos para avaliação da incerteza de medição pelo método de Monte Carlo mostraram-se eficazes, compatíveis com a avaliação de incerteza pelo método do ISO GUM, conforme apresentado nas tabelas 5.8, 5.9, 5.11 e 5.12.

As avaliações da incerteza de medição para o COP e capacidade de refrigeração a partir dos dados gerados pelo sistema desenvolvido, mostraram-se muito próximos daqueles encontrados por Petrovcic (2007), em sua avaliação de incertezas pelo método tradicional do ISO GUM, conforme mostrado na tabela 5.14, na figura 5.19, e na figura 5.20.

Tabela 5.14 - Comparação entre os resultados das incertezas do COP e capacidade para os dois métodos de avaliação de incertezas e condições de ensaio

	CAP CAL		CAP FM		COP CAL		COP FM	
	Referência	Sistema	Referência	Sistema	Referência	Sistema	Referência	Sistema
(-23,3 e +54,4) °C	0,52%	0,52%	0,43%	0,40%	0,57%	0,57%	0,49%	0,47%
(-35 e +65) °C	0,49%	0,46%	0,39%	0,30%	0,55%	0,53%	0,47%	0,41%

onde:

CAP CAL: é a capacidade de refrigeração encontrada empregando método do calorímetro;

CAP FM: é a capacidade de refrigeração pelo método do fluxo de massa;

COP CAL: é o COP determinado pelo método do calorímetro;

COP FM: é o COP pelo método do fluxo de massa.

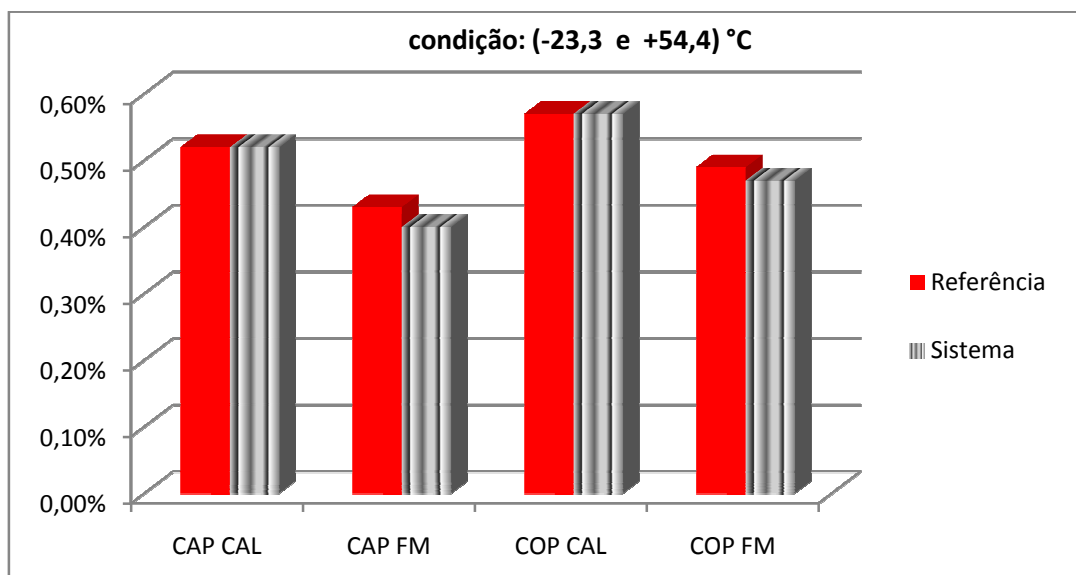


Figura 5.19 - Incertezas do COP e da capacidade de refrigeração para a condição (-23,3 e +54,4) °C

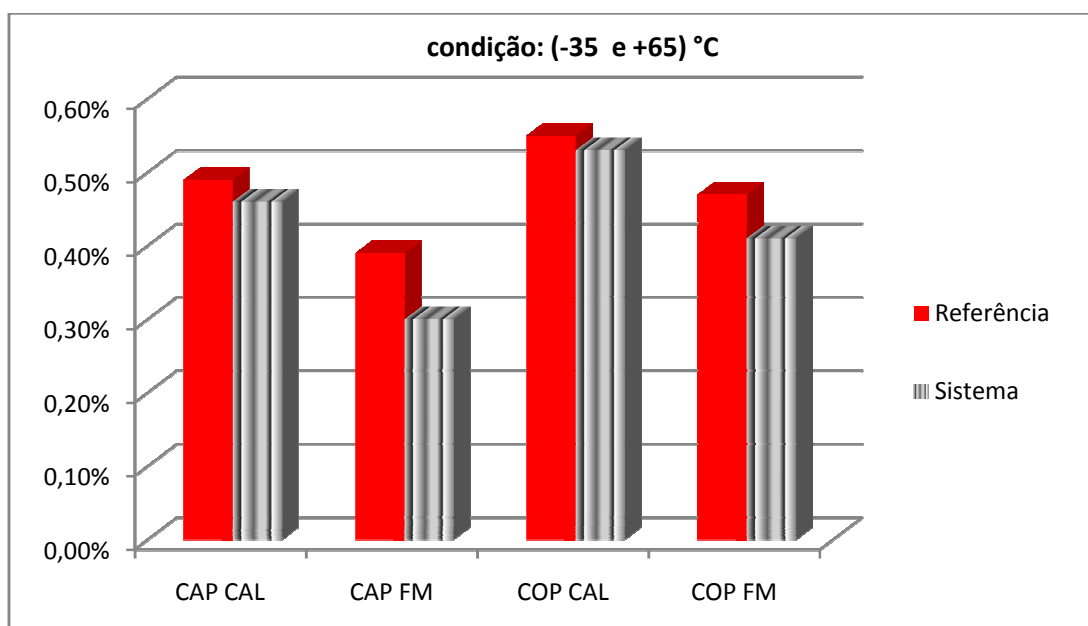


Figura 5.20 - Incertezas do COP e da capacidade de refrigeração para a condição (-35 e +65) °C

O requisito de integração com outros sistemas foi atendido, visto que os cálculos da incerteza do COP e capacidade de refrigeração foram realizados por outro sistema desenvolvido no trabalho de Flesch (2006). A integração consistiu em criar um padrão para os resultados de saída, de forma que o sistema de Flesch (2006) os entenda e utilize-os na determinação da incerteza do COP e capacidade. A chamada para o sistema de Flesch (2006) é feita através do módulo “Cálculo da Incerteza”.

Observa-se, para o caso em análise, que com o método de Monte Carlo é possível substituir a abordagem de avaliação de incertezas sugerida pelo ISO GUM, por apresentar menores limitações de aplicabilidade. Porém, seu uso prático somente é viável através do emprego de software especializado, como o aqui desenvolvido.

Os resultados obtidos comprovam a eficácia dos métodos e técnicas utilizados para o processamento dos dados de entrada e realização dos cálculos de incerteza.

Portanto, o presente trabalho gerou como resultado uma ferramenta de avaliação da incerteza de medição capaz de atender aos requisitos de usabilidade e confiabilidade definidos para o projeto, de forma a facilitar a análise de diversas configurações de cadeias de medição na montagem de painéis de ensaio de desempenho de compressores.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional para a avaliação da incerteza de medição, visando contribuir para a garantia da confiabilidade metrológica de sistemas de medição aplicados a bancadas de ensaio de desempenho de compressores.

Foi desenvolvido um protótipo no ambiente de programação LabVIEW. O procedimento para a avaliação da incerteza de medição foi baseado no “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)-Supplement 1*” (ISO, 2008), que busca estabelecer as bases para uma correta aplicação do método de simulação de Monte Carlo na avaliação de incertezas.

Um estudo de caso foi apresentado, confrontando-se com os resultados de outro trabalho de mestrado, onde a avaliação das incertezas de medição de uma bancada de ensaio de compressores foi realizada com o método tradicional proposto no ISO GUM (INMETRO, 2003).

A seguir são apresentadas conclusões deste trabalho, agrupadas de acordo com a afinidade.

a) Avaliação de incerteza:

- o ISO GUM, fortemente baseado em conceitos estatísticos, é um documento sem precedentes quanto à padronização do procedimento de avaliação de incertezas. Por outro lado, devido à sua redação de caráter científico, a sua aplicação a atividades industriais encontra dificuldades, em especial devido à falta de formação metrológica dos envolvidos;

- a necessidade de avaliação de sistemas de medição, composto por diversos módulos justapostos, resulta em um número maior de fontes de incerteza para serem quantificadas, dificultando sobremaneira a avaliação da incerteza;

- o modelo para avaliação da incerteza de sistemas de medição cresce significativamente em complexidade à medida que níveis menores de incerteza são necessários;

- a falta de padronização nas especificações e parâmetros dos módulos utilizados na análise de incerteza, por diversos fabricantes, dificulta a implementação do procedimento;

- o método proposto para a avaliação da incerteza de medição – simulação de Monte Carlo – pôde ser validado através da aplicação a uma bancada de ensaio de desempenho de compressores;

- a análise detalhada das especificações fornecidas para os sistemas de medição analisados, permitiu uma correta avaliação de incerteza, resultando em uma proximidade e coerência dos resultados apresentados, frente àqueles obtidos de uma avaliação de incertezas realizada pelo método tradicional de propagação de incertezas.

b) Sistema para a avaliação da incerteza auxiliado por computador:

- o sistema mostrou-se funcional, principalmente para a avaliação da composição de diversos módulos independentes, uma vez que o cálculo manual torna-se muito trabalhoso, senão impraticável;

- a implementação do protótipo foi realizada especificamente em LabVIEW, sendo um requisito a ser respeitado, visando à padronização e compatibilidade com outros sistemas desenvolvidos nos projetos em parceria com a empresa que atuou como parceira neste trabalho;

- o requisito que exigia a integração com sistemas desenvolvidos em outros trabalhos foi perfeitamente satisfeito. Os cálculos da incerteza para o COP e capacidade de refrigeração foram realizados por outro sistema desenvolvido por Flesch (2006), utilizando os resultados do sistema desenvolvido neste trabalho.

Com relação ao trabalho como um todo, pode-se concluir que os objetivos propostos foram plenamente atingidos. Um passo a mais foi dado para que a

garantia da confiabilidade metrológica possa ser alcançada dentro de processos de medição em bancadas de ensaio de desempenho de compressores.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foram identificadas as seguintes oportunidades relativas ao desenvolvimento de futuros trabalhos:

- utilização de uma linguagem de programação independente do sistema operacional, para que o sistema rode em outros sistemas operacionais como o Linux, estimulando o uso de softwares livres, reduzindo os gastos com a aquisição de licenças de uso de softwares;

- ampliação das potencialidades para avaliação de incerteza com simulação: o sistema poderia disponibilizar a opção de avaliar a incerteza através de outros métodos, como por exemplo, o Método da Integração Numérica via Transformadas de Fourier e Mellin (JORNADA, 2005);

- inserir mais uma funcionalidade no sistema: análise de custos das cadeias de medição utilizadas para configurar a bancada de ensaio de compressores, demonstrando, além da incerteza, o custo estimado para cada configuração simulada;

- implementação do controle confiável de acesso a usuários do sistema (bloqueio e visibilidade de informações de acordo com o usuário ativo, criptografia etc.), visando proteger as informações contidas na base de dados;

- não se pode esquecer o constante aperfeiçoamento, no tocante à necessidade do desenvolvimento contínuo de interfaces gráficas, que primem pela didática e intuitividade. O surgimento de novos recursos que proporcionam essa maior interatividade deve ser incorporado ao sistema gradativamente, acompanhando as tendências apresentadas por outros simuladores do mercado.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR 13772 - Termorresistência:** Calibração por comparação com termorresistência de referência. [s, L.]: Abnt, 1997.

ABNT. **NBR ISO/IEC 17025:** Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE 23-2005:** Methods of testing for rating positive displacement refrigerant compressors and condensing units. Atlanta, 2005.

BARBOSA, F. Q. . **Redução das incertezas nas medições de grandezas elétricas em uma bancada de ensaios de desempenho de compressores.** 2006. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BICH, W. ; COX, M. G. ; HARRIS, P. M. . Evolution of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. **Institute Of Physics Publishing**, Uk, n. 43, p.161-166, 2006.

CAMARANO, D. M.. **Procedimentos aplicáveis à garantia da qualidade metrológica dos resultados na termometria automatizada com termopar e sensores resistivos.** 1993. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

CAMARANO, D. M.; FLESCHE, C. A.. Erros na Multiplexação Automatizada de Transdutores de Temperatura Tipo Termopar, Termorresistor e Termistor. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIERIA MECÁNICA, 5., 1992, Punta Arenas. **Anais do Congresso Nacional de Ingenieria Mecánica.** Punta Arenas Chile: Sem, 1992.

KONRATH, A. C.; DONATELLI, G. D. . Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 13, n. 25/26, p.5-15, dez. 2005.

COX, M. G.; SIEBERT, B. R.. The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty. **Metrologia**, n. 43, p.178-188, 2006. Institute of Physics Publishing.

FLESCH, R. C. . **Desenvolvimento e Instalação de Recursos de Automação Aplicados a Ensaios de Compressores de Refrigeração da Embraco.** 2006. 120 f. Monografia (Graduação) - Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

FROTA, M. N.; VALCOV, L.; CALDAS, R.. **Programa RH-Metrologia:** Documento Básico. Rio de Janeiro: Stamp, 1999.

GONÇALVES JÚNIOR, A. A. ; SOUSA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** São Paulo: Manole, 2008. 407 p.

HENKLEIN, P. . **Análise de ensaios de desempenho de compressores herméticos durante o transitório.** 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

HOWART, P.; REDGRAVE, F.. **Metrology:** in short. Disponível em: <www.euramet.org>. Acesso em: 10 jul. 2008.

INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição.** Rio de Janeiro: Inmetro, 2003.

INMETRO. **VIM:** Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia. 5a Rio de Janeiro: Inmetro, 2007.

ISO. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)-Supplement 1:** Numerical Methods for the Propagation of Distributions. BIPM/JCGM, 2008.

ISO. **ISO 917:** Testing of Refrigerant Compressors. 2a Genebra: ISO, 1989.

JORNADA, D. H.; JORNADA, F. H.. **Cálculo de incerteza da medição:** estudo comparativo entre os métodos do GUM, Monte Carlo e de Integração Numérica. In: ENQUALAB – Encontro para a Qualidade de Laboratórios. São Paulo, 2005.

KACKER, R.; TOMAN, B.; HUANG, D.. Comparison of ISO-GUM, draft GUM Supplement 1 and Bayesian statistics using simple linear calibration. **Institute Of Physics Publishing,** Uk, n. 43, p.167-177, 2006.

MENDES, A.; ROSÁRIO, P. P.. **Metrologia & Incerteza de Medição.** São Paulo: Epse, 2005.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. LTC. Rio de Janeiro, 2003.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW Development Guidelines**. Disponível em: <www.ni.com/pdf/manuals/321393.pdf#labview_style_guide>. Acesso em: 10 maio 2008.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW QuickStart Guide**. 1999.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW User Manual**. 2003.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **Understanding Modular Instrumentation and Traditional Instrumentation Architectures for Automated Test Systems**. 2006. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4444>>. Acesso em: 15 jul. 2008.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Measuring Temperature with an RTD or Thermistor**. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3643>>. Acesso em: 08 jul. 2008.

PETROVIC, S. A.. **Proposta de arquitetura do sistema de automação aplicado a ensaios de desempenho de compressores herméticos de refrigeração**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PIZZOLATO, M.. **Mapeamento da Estrutura Global que Fornece Confiança às Medições: Análise da Inserção Brasileira**. 2006. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

POLETTI, E. L.. **Aprimoramento de uma bancada de ensaios de desempenho de compressores herméticos visando reduzir incertezas de medição**. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SCUSSEL, J. N.. **Propostas de ações para reduzir o tempo demandado por ensaio de desempenho de compressores herméticos**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SENSOR SCIENTIFIC. **Platinum thin film RTD elements**. Disponível em: <www.sensorsci.com>. Acesso em: 08 jul. 2008.

STEINBACH, K.. **Identificação do instante de entrada em condição de regime permanente em ensaios de desempenho de compressores.** 2008. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M.. **Refrigeração Industrial.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

THEISEN, A. M.. **Fundamentos da Metrologia Industrial:** aplicação no processo de certificação ISO 9000. Porto Alegre: Programa Rh-metrologia, 1997.

TRAVIS, J. D.. **LabVIEW for Everyone.** 2nd Saddle River-Usa: Prentice Hall, 2002.589 p.

W3C. **Extensible Markup Language: XML.** Disponível em: <<http://www.w3.org/XML/>>. Acesso em: 10 jul. 2008.